



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**AUTOMATIZACIÓN EN EL ENTORNO DE
PROGRAMACIÓN LABVIEW DE UN SISTEMA
FLEXIBLE DE INSTRUMENTACIÓN APLICADO A
LAS MEDIDAS ELÉCTRICAS**

PROYECTO FIN DE CARRERA
INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL ELECTRÓNICA

AUTOR: JACOBO OJEDA GARCÍA
TUTOR: MIGUEL TARDÍO LÓPEZ

MARZO, 2011

“Mide lo que sea medible y haz medible lo que no lo sea”

Galileo Galilei

Agradecimientos:

A mi tutor Miguel Tardío por la ayuda recibida en la realización de este trabajo y por su comprensión.

Al Departamento de Física de la Universidad Carlos III de Madrid por permitirme la realización de este proyecto.

A mi familia, por el apoyo ofrecido en estos años.

A Laura, por su apoyo constante.



ÍNDICE DE CONTENIDOS	I
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	XIV

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INSTRUMENTACIÓN	5
2.1. Medidas eléctricas. Elementos de un sistema de medida	7
2.1.1. Requerimientos básicos de una medida. Límites teóricos de una medida eléctrica	8
2.1.2. Instrumentos de medidas en corriente continua	9
2.1.2.1. Electrómetros.....	9
2.1.2.2. Multímetro digital (DMM)	11
2.1.2.3. Nanovoltímetros	12
2.1.2.4. Picoamperímetros	13
2.1.2.5. Fuente integrada en el instrumento de medida (SMU). SourceMeter	13
2.1.3. Funcionalidad de un sistema de medidas eléctricas	15
2.1.3.1. Elementos que afectan a la funcionalidad	16
2.1.3.2. Especificaciones técnicas de los instrumentos modulares de precisión que forman el sistema de medidas eléctricas.....	16
2.1.3.2.1. Nanovoltímetro Keithley 182	16
2.1.3.2.2. Multímetro digital Agilent 34401A	18
2.1.3.2.3. Picoamperímetro Keithley 6487	21
2.1.3.2.4. Electrómetro Keithley 6517A.....	23
2.1.3.2.5. SourceMeter Keithley 2410.....	27
2.1.3.3. Conexiones, cables y software	31
2.1.3.3.1. Nanovoltímetro Keithley 182	33
2.1.3.3.2. Multímetro digital Agilent 34401A	33
2.1.3.3.3. Picoamperímetro Keithley 6487	34
2.1.3.3.4. Electrómetro Keithley 6517A.....	35
2.1.3.3.5. SourceMeter Keithley 2410.....	39
2.1.4. Interfaz	43
2.1.4.1. General Purpose Interface Bus (GPIB)	44
2.1.4.2. Modos Device Dependent Command (DDC) y Standard Commands for Programmable Instruments (SCPI).....	47
2.1.4.3. Virtual Instruments Software Architecture (VISA) e Interchangeable Virtual Instruments (IVI).....	48
2.1.4.4. Programas para la comunicación GPIB.....	49



2.1.4.5. Programación GPIB	50
2.2. Elementos y parámetros básicos de un sistema de medidas	51
2.2.1. Parámetros básicos de un instrumento	51
2.2.1.1. Diagrama de bloques del instrumento	51
2.2.1.2. Resolución/sensibilidad.....	52
2.2.1.3. Precisión/Exactitud/Incertidumbre	53
2.2.1.4. Velocidad/bajo ruido	54
2.2.2. Medidas de señales en corriente alterna (CA)	55
2.2.2.1. Muestreo. Teorema de Nyquist	55
2.2.2.2. Formas de medir una corriente alterna	57
2.2.3. Parámetros críticos de funcionamiento	57
2.2.3.1. Especificaciones y error en la instrumentación. Previsión de error	57
2.2.3.2. Calibración	59
2.2.4. Fuentes comunes de error	59
2.2.4.1. Captura de ruido externo	60
2.2.4.2. Resistencia de las conexiones.....	60
2.2.4.3. Fuerza electromotriz (FEM) térmicas en conexiones.....	61
2.2.4.4. Carga de la impedancia de entrada.....	62
2.2.4.5. Capacidad / Tiempo de estabilización.....	63
2.2.4.6. Lazos de tierra	64
2.2.4.7. Guarda	66
2.2.4.8. Ruido Johnson	67
2.2.4.9. Interferencias magnéticas	69
2.2.4.10. Interferencias electromagnéticas (EMI)	71
2.3. Sistemas de medidas basados en PCs	71
2.3.1. Sistemas basados en una interfaz para adquisición de datos (DAQ)	72
2.3.2. Plataforma de software para la programación de instrumentos modulares.....	73
2.4. Circuitos de medidas. Aplicaciones.....	74
2.4.1. Medidas en dispositivos bajo test (DUT) de alta resistencia	74
2.4.1.1. Medidas en DUT de alta resistencia y baja corriente.....	74
2.4.1.2. Métodos para medida en dispositivos bajo test (DUT) de alta resistencia	74
2.4.1.2.1. Configuración con anillo de guarda.....	74
2.4.1.2.2. Medidas de resistencia/resistividad de volumen y superficie.....	78
2.4.1.2.3. El método de voltaje constante	81
2.4.1.2.4. El método de corriente constante.....	83
2.4.2. Medidas en dispositivos bajo test (DUT) de baja resistencia	84
2.4.2.1. Medidas de baja resistencia y baja tensión.....	84
a) Voltaje de offset	85
b) Potenciales termoelectrónicos	85
c) Ruido Johnson	89
d) Interferencias electromagnéticas (EMI)	89
e) Interferencias magnéticas	90
f) Lazos de tierra.....	90



g) Corrientes en modo común	90
h) Efecto de los contactos no óhmicos	92
i) Efecto del calentamiento de los dispositivos.....	92
2.4.2.2. Métodos de medida de baja resistencia	93
2.4.2.2.1. Medidas de resistencias a dos puntas	93
2.4.2.2.2. Medidas de resistencias a cuatro puntas	94
2.5. Otros circuitos de medidas.....	96
2.5.1. Medidas de carga eléctrica. Electrómetro	96
2.5.1.1. Medida de muy bajas corrientes.....	97
2.5.2. Medidas de coeficiente de voltaje en sistemas de alta resistencia	97
2.6. Medidas de temperatura con alta resolución.....	99
2.6.1. Termopares. Tipo K	99
2.6.2. Módulo de temperatura	99
2.6.3. Horno vertical	100
2.6.3.1. Características del horno	100
2.6.3.2. Regulación de temperatura. Control PXR-4.....	101
2.6.3.3. Criterio de funcionamiento del horno	104
2.6.3.4. Aplicación en LabView	106
3. PLATAFORMA LABVIEW.....	111
3.1. Principios	113
3.1.1. Panel frontal	113
3.1.2. Diagrama de bloques.....	114
3.1.3. Paletas	115
3.1.3.1. Paleta de herramientas (Tools palette)	115
3.1.3.2. Paleta de controles (Controls palette)	115
3.1.3.3. Paleta de de funciones (Functions palette)	116
3.2. Programación modular.....	117
3.2.1. Niveles funcionales	117
3.3. Estructuras y herramientas más utilizadas	120
3.3.1. Case Structure	121
3.3.2. Sequence Structure.....	121
3.3.3. For Loop.....	122
3.3.4. While Loop	122
3.3.5. Formula Node	122
3.3.6. Event Structure.....	123
3.3.7. Property node	123
3.3.8. Radio buttons	124
3.3.9. Tab control	125
3.4. Diagrama de bloques básico. Diagrama de estados.....	125
3.4.1. INI	127
3.4.2. SETUP	127
3.4.3. START	129
3.4.4. EXIT.....	130

3.5. Programación de instrumentos modulares en LabView	131
3.6. Panel frontal básico.....	133
3.6.1. Bloque 0	134
3.6.2. Bloque 1	134
3.6.3. Bloque 2	135
3.6.4. Bloque 3	136
3.6.5. Bloque 4	136
3.6.6. Bloque 5	139
3.7. Instrumentos virtuales comunes (subVIs)	140
3.7.1. V to ° C.vi.....	141
3.7.2. TEMP HP.vi.....	143
3.7.3. ORIGIN.....	144
3.7.3.1. ORIGIN xCOL subvi-A.vi	144
3.7.3.2. ORIGIN xCOL subvi-B	144
3.7.3.3. ORIGIN xCOL subvi-C.vi	145
3.7.4. arreglo.vi	145
3.7.5. 2410.....	146
3.7.5.1. 2410 LEVEL ini.vi	146
3.7.5.2. 2410 LEVEL read.vi	147
3.7.5.3. 2410 SWEEP config.vi.....	147
3.7.5.4. 2140 SWEEP ini.vi.....	148
3.7.5.5. 2410 SWEEP tlink.vi	148
3.8. Niveles jerárquicos	149
 4. PROGRAMAS MODULARES Y ESPECÍFICOS.....	 153
4.1. Programas modulares.....	155
4.1.1. Multímetro Agilent 34401A.....	155
4.1.1.1. Aplicación Temp module	155
4.1.1.1.1. Controles e indicadores de la aplicación	156
4.1.1.2. Aplicación Temp only	160
4.1.2. Nanovoltímetro Keithley 182.....	161
4.1.2.1. Aplicación Temp module	161
4.1.2.1.1. Controles e indicadores de la aplicación	162
4.1.3. Picoamperímetro Keithley 6487	164
4.1.3.1. Aplicación Temp module	164
4.1.3.1.1. Controles e indicadores de la aplicación	165
4.1.3.2. Aplicación Temp only	169
4.1.4. Electrómetro Keithley 6517A	170
4.1.4.1. Aplicación Temp module	170
4.1.4.1.1. Controles e indicadores de la aplicación	171
4.1.4.2. Aplicación Temp only	177
4.1.4.3. Aplicación Applications	178
4.1.5. SourceMeter Keithley 2410	181
4.1.5.1. Aplicación Temp module	181



4.1.5.1.1. Controles e indicadores de la aplicación	182
4.1.5.2. Aplicación Temp discrim	187
4.1.5.2.1. Controles e indicadores de la aplicación	188
4.2. Programa específico.....	193
4.2.1. SourceMeter, electrómetro y picoamperímetro. Keithley 2410, 6517A y 6487.....	193
4.2.1.1. Aplicación Temp module	193
4.2.1.1.1. Controles e indicadores de la aplicación	194
5. PORTABILIDAD. APLICACIONES EXE	201
6. CONCLUSIONES. LÍNEAS FUTURAS	209
7. REFERENCIAS	215
8. ANEXO	219
8.1. Simulación de costes.....	221

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1. Elementos de un sistema de medida</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2.2. Sistema simplificado de un sistema de medida</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2.3. Límites teóricos en la medida de tensión</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.4. Medida de alta resistencia utilizando un electrómetro</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2.5. Medida de alta resistencia con la utilización de un DMM</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.6. Esquema para la medida de baja resistencia utilizando un nanovoltímetro ...</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.7. Modo de fuente de corriente de un SourceMeter</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.8. Modo de fuente de tensión para un SourceMeter.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.9. Rango de medición de los instrumentos de alta precisión</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.10. Panel frontal del nanovoltímetro Keithley 182</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.11. Panel trasero del nanovoltímetro Keithley 182.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2.12. Panel frontal del multímetro Agilent 34401A</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.13. Panel trasero del multímetro Agilent 34401A.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2.14. Panel frontal del picoamperímetro Keithley 6487</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2.15. Panel trasero del picoamperímetro Keithley 6487</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2.16. Panel frontal del electrómetro Keithley 6517A.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 2.17. Panel trasero del electrómetro Keithley 6517A</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2.18. Característica I-V del instrumento Keithley 2410</i>	<i>28</i>
<i>Figura 2.19. Panel frontal del SourceMeter Keithley 2410.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2.20. Panel trasero del SourceMeter Keithley 2410</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2.21. Detalle de conector tipo BNC</i>	<i>32</i>
<i>Figura 2.22. Conexión típica de prueba en el nanovoltímetro Keithley 182</i>	<i>33</i>
<i>Figura 2.23. Conexiones para medidas de voltaje (a) y corriente (b) en el multímetro Agilent 34401A</i>	<i>34</i>
<i>Figura 2.24. Detalle del conector de entrada para el instrumento Keithley 6487</i>	<i>34</i>
<i>Figura 2.25. Conexiones básicas para medidas de corriente (a) y resistencia (b) en el instrumento Keithley 6487.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 2.26. Conexión para la utilización de la fuente del instrumento Keithley 6487</i>	<i>35</i>
<i>Figura 2.27. Configuración del conector de la sonda de medida sin guarda (a) y con guarda (b) en el instrumento Keithley 6517A</i>	<i>36</i>
<i>Figura 2.28. Configuración para medida de voltaje con el electrómetro Keithley 6517A.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 2.29. Configuración para medida de voltaje con guarda utilizando el electrómetro Keithley 6517A</i>	<i>37</i>
<i>Figura 2.30. Configuración para medida de corriente utilizando el electrómetro Keithley 6517A</i>	<i>37</i>
<i>Figura 2.31. Configuración para medida de carga con el electrómetro Keithley 6517A ..</i>	<i>38</i>
<i>Figura 2.32. Configuración para medida de resistencia con el electrómetro Keithley 6517A.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 2.33. Configuración para medida de temperatura con el electrómetro Keithley 6517A.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 2.34. Conexión para la utilización de la fuente del instrumento Keithley 6517A...</i>	<i>39</i>

<i>Figura 2.35. Configuración de conexión para la medida a dos (a) y cuatro (b) puntas con el SourceMeter Keithley 2410 desde el panel frontal.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 2.36. Configuración para medida con guarda a dos puntas con el instrumento Keithley 2410.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 2.37. Pines del conector TLINK</i>	<i>41</i>
<i>Figura 2.38. Especificaciones para el pulso TTL de entrada y de salida del TLink.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 2.39. Configuración de conexión de los instrumentos Keithley 2410, 6517A y 6487 para sincronizar el disparo con Tlink</i>	<i>42</i>
<i>Figura 2.40. Cable (a) y terminal (b) de conexión en el estándar GPIB.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 2.41. Pines del terminal de conexión GPIB con conector americano (a) y europeo (b)</i>	<i>45</i>
<i>Figura 2.42. Tarjetas controladoras de bus GPIB para PC a través de interfaz PCI (a) y USB (b)</i>	<i>46</i>
<i>Figura 2.43. PC portátil e instrumento de medida con conexión USB-GPIB</i>	<i>46</i>
<i>Figura 2.44. Conexión lineal (a) y en estrella (b) de un conjunto de instrumentos con bus GPIB</i>	<i>47</i>
<i>Figura 2.45. Comando SPCI para osciloscopio</i>	<i>48</i>
<i>Figura 2.46. Estructura de programación de un sistema GPIB</i>	<i>50</i>
<i>Figura 2.47. Diagrama de bloques de un sistema de medidas</i>	<i>51</i>
<i>Figura 2.48. Diagrama básico de un instrumento de medida.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 2.49. Diferencia entre resolución, precisión y exactitud</i>	<i>54</i>
<i>Figura 2.50. Reconstrucción de una señal de alta frecuencia muestreada a baja frecuencia (a) y a alta frecuencia (b)</i>	<i>56</i>
<i>Figura 2.51. Errores de ganancia y de offset en función del nivel de la medida expresado como porcentaje del rango.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 2.52. Error debido a la resistencia de las conexiones en medidas a dos puntas</i>	<i>60</i>
<i>Figura 2.53. Circuito equivalente en el método de medida a cuatro puntas</i>	<i>61</i>
<i>Figura 2.54. Ejemplo de FEM térmicas en conexiones</i>	<i>62</i>
<i>Figura 2.55. Esquema de un multímetro ideal V conectado a una fuente de tensión V_S</i>	<i>63</i>
<i>Figura 2.56. Retardo de un instrumento de medida en la producción de respuesta ante los estímulos (en cada flanco de subida)</i>	<i>64</i>
<i>Figura 2.57. Ejemplo de la generación de lazos de tierra</i>	<i>65</i>
<i>Figura 2.58. Conexión simple de tierra en un solo punto</i>	<i>65</i>
<i>Figura 2.59. Ejemplo de circuito con y sin guarda.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 2.60. Circuito equivalente de una fuente de ruido ideal</i>	<i>67</i>
<i>Figura 2.61. Límites típicos de medidas para varias resistencias de fuente en: Multímetro digital (DMM), Nanovoltímetro (nVM), Nanovolt Preamplificado (nV PreAmp), y Electrómetro.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 2.62. Ejemplo de baja tensión generada por campos magnéticos</i>	<i>69</i>
<i>Figura 2.63. Ejemplo de interferencia magnética producido en el circuito de entrada de un multímetro digital</i>	<i>70</i>
<i>Figura 2.64. Técnica de conexión entrecruzada para la mitigación de campos magnéticos.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 2.65. Ejemplo de doble apantallamiento para atenuar interferencias EMI.....</i>	<i>71</i>

<i>Figura 2.66. Tarjetas de adquisición de datos con bus PCI</i>	<i>72</i>
<i>Figura 2.67. Circuito equivalente para medidas de tensión considerando el efecto resistivo de carga</i>	<i>75</i>
<i>Figura 2.68. Esquema de conexión de guarda para reducir el efecto de carga resistivo en medidas de voltaje</i>	<i>75</i>
<i>Figura 2.69. Circuito equivalente para medidas de tensión considerando el efecto capacitivo de carga</i>	<i>76</i>
<i>Figura 2.70. Respuesta exponencial de carga del condensador equivalente C_L</i>	<i>77</i>
<i>Figura 2.71. Esquema de conexión de guarda para reducir el efecto de carga capacitivo</i>	<i>78</i>
<i>Figura 2.72. Esquema de medida de resistividad de volumen</i>	<i>79</i>
<i>Figura 2.73. Dimensiones del electrodo y formas típicas del material</i>	<i>80</i>
<i>Figura 2.74. Esquema para la medida de resistividad de superficie</i>	<i>80</i>
<i>Figura 2.75. Configuración del método de voltaje constante</i>	<i>81</i>
<i>Figura 2.76. Configuración del método de voltaje constante para minimizar los efectos de las fuentes de error</i>	<i>82</i>
<i>Figura 2.77. Configuración del método de corriente constante</i>	<i>83</i>
<i>Figura 2.78. Configuración del método de corriente constante para minimizar los efectos de las fuentes de error</i>	<i>84</i>
<i>Figura 2.79. Efecto del voltaje de offset en la medida de voltaje en baja tensión</i>	<i>85</i>
<i>Figura 2.80. Potenciales termoeléctricos</i>	<i>86</i>
<i>Figura 2.81. Ejemplo de potenciales termoeléctricos debido a las conexiones</i>	<i>87</i>
<i>Figura 2.82. Cancelación del potencial termoeléctrico con inversión de polaridad</i>	<i>87</i>
<i>Figura 2.83. Medida con polaridad positiva y negativa para la cancelación de los potenciales termoeléctricos</i>	<i>88</i>
<i>Figura 2.84. Medida con conexión - desconexión de la fuente de corriente para la cancelación de los potenciales termoeléctricos</i>	<i>89</i>
<i>Figura 2.85. Ejemplo de corrientes en modo común</i>	<i>90</i>
<i>Figura 2.86. Correcta conexión a los terminales de entrada del instrumento de medida ..</i>	<i>91</i>
<i>Figura 2.87. Incorrecta conexión a los terminales de entrada del instrumento de medida</i>	<i>91</i>
<i>Figura 2.88. Aislamiento del dispositivo bajo prueba</i>	<i>92</i>
<i>Figura 2.89. Magnitud de las tensiones de error</i>	<i>93</i>
<i>Figura 2.90. Esquema de medida de resistencia a dos puntas</i>	<i>94</i>
<i>Figura 2.91. Esquema para medida de resistencia a cuatro puntas</i>	<i>95</i>
<i>Figura 2.92. Esquema básico de medida de capacidad con un electrómetro midiendo carga</i>	<i>96</i>
<i>Figura 2.93. Esquema para la medida de muy bajas corrientes con un electrómetro a partir de la función de coulombímetro</i>	<i>97</i>
<i>Figura 2.94. Prueba para cálculo de coeficiente de voltaje con un electrómetro Keithley 6517A utilizando su propia fuente V y configurado en modo de medida de corriente</i>	<i>98</i>
<i>Figura 2.95. Esquema de termopar tipo K y la sonda real</i>	<i>99</i>
<i>Figura 2.96. Horno vertical con regulador de temperatura</i>	<i>100</i>
<i>Figura 2.97. Porta-muestras junto a la boca de entrada del horno</i>	<i>101</i>

<i>Figura 2.98. Regulador de temperatura Fuji PXR-4</i>	<i>101</i>
<i>Figura 2.99. Rampa programable de 8 niveles para el horno</i>	<i>102</i>
<i>Figura 2.100. Medidas de temperatura del termopar interno del horno y el porta-muestras con 8 rampas/mantenimientos para tres rangos.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 2.101. Característica V-I del DUT para temperaturas de 95°C, 104°C y 122°C</i>	<i>108</i>
<i>Figura 2.102. Característica V-I del DUT para temperaturas de 160°C, 187°C y 210°C</i>	<i>108</i>
<i>Figura 2.103. Dependencia de la resistencia con la temperatura para una muestra de MgO:Li oxidada</i>	<i>109</i>
<i>Figura 3.1. Ejemplo de panel frontal en LabView</i>	<i>114</i>
<i>Figura 3.2. Ejemplo de diagrama de bloques en LabView</i>	<i>114</i>
<i>Figura 3.3. Paleta de herramientas</i>	<i>115</i>
<i>Figura 3.4. Paleta de controles</i>	<i>116</i>
<i>Figura 3.5. Paleta de funciones</i>	<i>116</i>
<i>Figura 3.6. Icono de un controlador en el diagrama de bloques.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 3.7. Niveles funcionales de comunicación.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 3.8. Icono funcional del asistente de E/S en el diagrama de bloques</i>	<i>119</i>
<i>Figura 3.9. Función de escritura bajo VISA</i>	<i>119</i>
<i>Figura 3.10. Detalle de estructura Case</i>	<i>121</i>
<i>Figura 3.11. Detalle de estructura Sequence</i>	<i>121</i>
<i>Figura 3.12. Detalle de estructura For Loop.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 3.13. Detalle de estructura While Loop</i>	<i>122</i>
<i>Figura 3.14. Detalle de estructura Formula Node.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 3.15. Detalle de estructura Event Structure</i>	<i>123</i>
<i>Figura 3.16. Property node de un control.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 3.17. Control Radio buttons con la opción R seleccionada</i>	<i>124</i>
<i>Figura 3.18. Tab control de dos páginas</i>	<i>125</i>
<i>Figura 3.19. Diagrama de estados del sistema básico</i>	<i>126</i>
<i>Figura 3.20. Botones Setup, Start y Exit</i>	<i>126</i>
<i>Figura 3.21. Detalle básico de la programación del estado INI</i>	<i>127</i>
<i>Figura 3.22. Detalle básico del diagrama de bloques del estado SETUP.....</i>	<i>128</i>
<i>Figura 3.23. Detalle básico del paso del estado SETUP al START.....</i>	<i>128</i>
<i>Figura 3.24. Detalle básico del paso del estado SETUP al EXIT</i>	<i>129</i>
<i>Figura 3.25. Detalle básico del diagrama de bloques de estado START.....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 3.26. Detalle del diagrama de bloques de estado START</i>	<i>130</i>
<i>Figura 3.27. Detalle del diagrama de bloques de estado EXIT.....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 3.28. Diagrama de flujo para configuración de instrumentos en LabView</i>	<i>131</i>
<i>Figura 3.29. Etiqueta de direcciones en LabView</i>	<i>133</i>
<i>Figura 3.30. Panel frontal del programa Keithley 6517A</i>	<i>133</i>
<i>Figura 3.31. Nombre el instrumento implementado</i>	<i>134</i>
<i>Figura 3.32. Nombre de la aplicación visualizada</i>	<i>134</i>
<i>Figura 3.33. Control Start.....</i>	<i>134</i>



<i>Figura 3.34. Control Exit</i>	135
<i>Figura 3.35. Control Output File</i>	135
<i>Figura 3.36. Control del módulo de temperatura</i>	136
<i>Figura 3.37. Control del modo de fuente</i>	136
<i>Figura 3.38. Control de activación/desactivación de la fuente</i>	136
<i>Figura 3.39. Selector de medida</i>	137
<i>Figura 3.40. Controles Resolution y Range</i>	137
<i>Figura 3.41. Control Rate</i>	138
<i>Figura 3.42. Controles Samples y Delay.....</i>	138
<i>Figura 3.43. Control Display</i>	138
<i>Figura 3.44. Control Setup.....</i>	139
<i>Figura 3.45. Conjunto del indicador para la medida resultante</i>	139
<i>Figura 3.46. Gráfica de la medida obtenida en función del tiempo</i>	140
<i>Figura 3.47. Paleta de la gráfica</i>	140
<i>Figura 3.48. Icono genérico de un subVI.....</i>	141
<i>Figura 3.49. Conversor de voltaje a °C.....</i>	141
<i>Figura 3.50. Esquema del principio de funcionamiento del subVI: V to °C.vi</i>	142
<i>Figura 3.51. Detalle del diagrama de bloques del conversor de voltaje a temperatura ..</i>	143
<i>Figura 3.52. Sub-VI Temp HP con entradas y salidas.....</i>	143
<i>Figura 3.53. Archivos subVIs para la interacción con Origin 8.....</i>	145
<i>Figura 3.54. Sub-VI arreglo.vi con entradas y salidas</i>	146
<i>Figura 3.55. Archivo 2410 LEVEL ini.vi con entradas y salidas.....</i>	147
<i>Figura 3.56. Archivo 2410 LEVEL read.vi con entradas y salidas</i>	147
<i>Figura 3.57. Función 2410 SWEEP config.vi con entradas y salidas</i>	148
<i>Figura 3.58. Función 2410 SWEEP ini.vi con entradas y salidas</i>	148
<i>Figura 3.59. Función 2410 SWEEP tlink.vi con entradas y salidas</i>	149
<i>Figura 3.60. Jerarquía de programa del instrumento Agilent 34401A</i>	150
<i>Figura 3.61. Jerarquía de programa del instrumento Keithley 182</i>	150
<i>Figura 3.62. Jerarquía de programa del instrumento Keithley 6487</i>	151
<i>Figura 3.63. Jerarquía de programa del instrumento Keithley 6517A.....</i>	151
<i>Figura 3.64. Jerarquía de programa del instrumento Keithley 2410</i>	152
<i>Figura 3.65. Jerarquía de programa de los instrumentos: Keithley 2410,6517A y 6487.....</i>	152
<i>Figura 4.1. Panel frontal de la aplicación Temp module del multímetro Agilent 34401A</i>	156
<i>Figura 4.2. Control Address.....</i>	156
<i>Figura 4.3. Control Temp.....</i>	157
<i>Figura 4.4. Control de selección 182/34401A</i>	157
<i>Figura 4.5. Control de selección 182/34401A y control temp/volt</i>	157
<i>Figura 4.6. Control Lab Temp °C.....</i>	157
<i>Figura 4.7. Control AUTO Res & Rango.....</i>	158
<i>Figura 4.8. Control AC Filter</i>	158
<i>Figura 4.9. Control Input R.....</i>	158



<i>Figura 4.10. Control Rate</i>	159
<i>Figura 4.11. Control de selección de la función de medida</i>	159
<i>Figura 4.12. Panel frontal de la aplicación Temp only del instrumento Agilent 34401A</i>	160
<i>Figura 4.13. Panel frontal de la aplicación Temp module del instrumento Keithley 182</i>	161
<i>Figura 4.14. Control Temp.....</i>	162
<i>Figura 4.15. Control Filters</i>	162
<i>Figura 4.16. Control Rate</i>	163
<i>Figura 4.17. Control Resolution</i>	163
<i>Figura 4.18. Control Range</i>	163
<i>Figura 4.19. Indicadores para la medida del módulo de temperatura</i>	163
<i>Figura 4.20. Panel frontal de la aplicación Temp module del instrumento Keithley 6487.....</i>	164
<i>Figura 4.21. Control Temp.....</i>	165
<i>Figura 4.22. Control Source On/Off</i>	165
<i>Figura 4.23. Control Source Mode</i>	166
<i>Figura 4.24. Control LEVEL (V)</i>	166
<i>Figura 4.25. Controles Start, Stop, Step y Delay</i>	166
<i>Figura 4.26. Control Range</i>	167
<i>Figura 4.27. Control Limit</i>	167
<i>Figura 4.28. Control de selección de la función de medida</i>	167
<i>Figura 4.29. Control AUTO Res & Rango.....</i>	168
<i>Figura 4.30. Control Filters</i>	168
<i>Figura 4.31. Control Rate</i>	168
<i>Figura 4.32. Panel frontal de la aplicación Temp only del instrumento Keithley 6487... ..</i>	169
<i>Figura 4.33. Panel frontal de la aplicación Temp module del instrumento Keithley 6517A</i>	170
<i>Figura 4.34. Control Temp.....</i>	171
<i>Figura 4.35. Control Source On/Off</i>	171
<i>Figura 4.36. Control Source Mode</i>	172
<i>Figura 4.37. Control LEVEL (V)</i>	172
<i>Figura 4.38. Controles Start, Stop, Step y Delay</i>	173
<i>Figura 4.39. Control Range</i>	173
<i>Figura 4.40. Control R-Limit</i>	173
<i>Figura 4.41. Control Limit</i>	173
<i>Figura 4.42. Control Meter-connect</i>	174
<i>Figura 4.43. Controles ZeroCheck, REL y Zcor</i>	174
<i>Figura 4.44. Control de selección de la función de medida</i>	174
<i>Figura 4.45. Control Resolution</i>	175
<i>Figura 4.46. Control Range</i>	175
<i>Figura 4.47. Control Filters</i>	175
<i>Figura 4.48. Control Rate</i>	175
<i>Figura 4.49. Control Guard shield.....</i>	175
<i>Figura 4.50. Control Man/Auto.....</i>	176



<i>Figura 4.51. Control Surface/Volume</i>	176
<i>Figura 4.52. Control D1/D2</i>	176
<i>Figura 4.53. Control D1/Thickness</i>	176
<i>Figura 4.54. Panel frontal de la aplicación Temp only del instrumento Keithley 6517A</i>	177
<i>Figura 4.55. Panel frontal de la aplicación Applications del instrumento Keithley 6517A</i>	178
<i>Figura 4.56. Control Application</i>	179
<i>Figura 4.57. Control Meter-connect</i>	179
<i>Figura 4.58. Control Range</i>	180
<i>Figura 4.59. Panel frontal de la aplicación Temp module del instrumento Keithley 2410</i>	181
<i>Figura 4.60. Control Temp</i>	182
<i>Figura 4.61. Control Function</i>	182
<i>Figura 4.62. Controles Range y Compliance para fuente de voltaje</i>	183
<i>Figura 4.63. Control Source Mode</i>	183
<i>Figura 4.64. Control LEVEL (V)</i>	183
<i>Figura 4.65. Controles de parámetros de rampa (SWEEP)</i>	184
<i>Figura 4.66. Controles de parámetros de rampa (PROG)</i>	184
<i>Figura 4.67. Control de selección de la función de medida</i>	185
<i>Figura 4.68. Control Resolution</i>	185
<i>Figura 4.69. Control Range</i>	185
<i>Figura 4.70. Control Filter</i>	185
<i>Figura 4.71. Control Rate</i>	186
<i>Figura 4.72. Control Guard shield.....</i>	186
<i>Figura 4.73. Control Man/Auto.....</i>	186
<i>Figura 4.74. Control 2-wire/4-wire.....</i>	186
<i>Figura 4.75. Indicador Source ON.....</i>	187
<i>Figura 4.76. Panel frontal de la aplicación Temp discrim del instrumento Keithley 2410.....</i>	188
<i>Figura 4.77. Controles del módulo de temperatura de la aplicación Temp discrim</i>	189
<i>Figura 4.78. Control Discriminator</i>	189
<i>Figura 4.79. Control I-V</i>	189
<i>Figura 4.80. Controles que fijan las condiciones del discriminador.....</i>	190
<i>Figura 4.81. Controles del instrumento 2410 en el módulo discriminador.....</i>	191
<i>Figura 4.82. Representación gráfica de la curva I-V</i>	191
<i>Figura 4.83. Controles 2W/4W y Source on.....</i>	191
<i>Figura 4.84. Controles del módulo Ramp Temp</i>	192
<i>Figura 4.85. Panel frontal Temp module de los instrumentos K. 2410-6517A-6487</i>	193
<i>Figura 4.86. Control Temp.....</i>	194
<i>Figura 4.87. Control Rate</i>	194
<i>Figura 4.88. Control Source</i>	195
<i>Figura 4.89. Control Function</i>	195
<i>Figura 4.90. Controles Range y Compliance para fuente de voltaje</i>	195



<i>Figura 4.91. Control Source Mode</i>	<i>195</i>
<i>Figura 4.92. Control LEVEL (V)</i>	<i>196</i>
<i>Figura 4.93. Controles de parámetros de rampa (SWEEP)</i>	<i>196</i>
<i>Figura 4.94. Controles de parámetros de rampa (Prog)</i>	<i>197</i>
<i>Figura 4.95. Control VOLT.....</i>	<i>197</i>
<i>Figura 4.96. Controles Resolution y Range</i>	<i>197</i>
<i>Figura 4.97. Control Filter</i>	<i>198</i>
<i>Figura 4.98. Control Rate</i>	<i>198</i>
<i>Figura 4.99. Control CURR</i>	<i>198</i>
<i>Figura 4.100. Controles Resolution y Range</i>	<i>198</i>
<i>Figura 4.101. Control Filter</i>	<i>199</i>
<i>Figura 4.102. Control Rate</i>	<i>199</i>
<i>Figura 4.103. Control Trig Out.....</i>	<i>199</i>
<i>Figura 4.104. Control Displays.....</i>	<i>200</i>
<i>Figura 4.105. Controles de pantalla de los instrumentos</i>	<i>200</i>
<i>Figura 4.106. Indicador Source ON.....</i>	<i>200</i>
<i>Figura 5.1. Detalle del menú raíz del proyecto 6517A</i>	<i>204</i>
<i>Figura 5.2. Detalle de las propiedades del archivo ejecutable 6517A.exe.....</i>	<i>204</i>
<i>Figura 5.3. Detalle de las propiedades del instalador del ejecutable 6517A.exe.....</i>	<i>206</i>
<i>Figura 5.4. Detalle de las propiedades del instalador de software adicional común</i>	<i>207</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1. Funciones de prueba del electrómetro Keithley 6517A.....</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 2.2. Lecturas máximas del instrumento Keithley 182</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 2.3. Precisión en función del rango y la resolución del instrumento Keithley 182 ..</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 2.4. Lecturas máximas y precisión del picoamperímetro Keithley 6487 en función del rango de medida</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 2.5. Máxima salida y tamaño del paso en función del rango para la fuente de tensión presente en el instrumento Keithley 6487</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 2.6. Rangos del electrómetro Keithley 6517A para medidas de voltaje</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 2.7. Rangos del electrómetro Keithley 6517A para medidas de corriente</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 2.8. Rangos del electrómetro Keithley 6517A para medidas de resistencias en modo auto</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 2.9. Rangos del electrómetro Keithley 6517A para medidas de carga.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 2.10. Rangos del electrómetro Keithley 6517A para el voltaje de fuente</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 2.11. Rangos del electrómetro Keithley 6517A para medidas de temperatura</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 2.12. Límites máximos para el instrumento Keithley 2410.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 2.13. Valor máximo de compliance en función del rango de medida en el instrumento Keithley 2410.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 2.14. Porcentajes de valor final para tiempo normalizados en la carga del condensador C_L</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 2.15. Coeficiente de Seebeck para varios materiales</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 2.16. Valores de temperatura de consigna SV-1 a SV-8 para cada rango de temperatura</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 8.1. Coste del personal en base a su categoría y dedicación.....</i>	<i>221</i>
<i>Tabla 8.2. Coste de los equipos utilizados</i>	<i>222</i>
<i>Tabla 8.3. Coste de las licencias de LabView y LabView Application Builder</i>	<i>222</i>
<i>Tabla 8.4. Otros costes directos del proyecto</i>	<i>223</i>
<i>Tabla 8.5. Coste total del proyecto</i>	<i>223</i>



1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

Este proyecto surgió de la idea de automatizar los instrumentos de medida de precisión presentes en el Laboratorio de Medidas Eléctricas del Departamento de Física de la Universidad Carlos III de Madrid.

La automatización de un proceso de medida reduce el fallo de origen humano, minimizando el daño catastrófico sobre la instrumentación, que provoca una mala gestión en el uso de la misma. La automatización posibilita trabajar con más de un instrumento de manera simultánea y permite realizar procesos de forma continua por medio de secuencias programadas, lo que añade robustez al sistema.

Por otra parte, se reducen los tiempos de recopilación y procesamiento de la información obtenida, permitiendo un conocimiento más detallado del proceso de medida. Además, permite la implementación de funciones de análisis, optimización y autodiagnóstico del instrumento.

Para el desarrollo de este proyecto se dispuso de la siguiente instrumentación: multímetro Agilent 34401A, nanovoltímetro Keithley 182, picoamperímetro Keithley 6487, electrómetro Keithley 6517A y SourceMeter Keithley 2410. También se ha contado con un ordenador de sobremesa y un ordenador portátil y tarjetas GPIB-PCI y GPIB-USB de National Instruments.

Todos los programas de control y automatización de la instrumentación fueron implementados en la plataforma de desarrollo gráfico LabView de National Instruments. Este lenguaje de programación permite crear una interfaz de usuario, intuitiva y de fácil manejo, que proporciona una mejor interacción con los instrumentos.

Los objetivos del proyecto han sido:

- Estudiar los fundamentos de las técnicas de medida de magnitudes eléctricas mediante el uso de instrumentos de alta precisión.
- Aprender el manejo de los instrumentos de medidas eléctricas cuyo funcionamiento se pretende automatizar: multímetro, nanovoltímetro, picoamperímetro, electrómetro y SourceMeter.
- Adquisición de conocimientos de la programación G bajo el entorno gráfico de LabView.
- Llevar a cabo el montaje físico de la interfaz de comunicación de los distintos instrumentos de medida y el sistema de control (ordenador).
- Desarrollar programas modulares y de aplicación específica que permitan el control y la automatización de los instrumentos de medidas eléctricas en laboratorio, así como la adquisición de los datos generados y su posterior almacenamiento para su estudio.

- Realización de medidas experimentales en muestras conocidas de óxido cerámico que permitan comprobar el correcto funcionamiento de las aplicaciones desarrolladas.
- Creación de archivos auto-ejecutables que proporcionen portabilidad global a los programas desarrollados. Los archivos permiten instalar los programas modulares y de aplicación específica para que sean ejecutados con independencia del ordenador, aunque no tenga instalada la plataforma de programación LabView.

Esta memoria consta de seis capítulos que se detallan a continuación:

En este primer capítulo se realiza una introducción del proyecto, se definen los objetivos del mismo y se realiza una descripción del contenido de cada capítulo.

En el capítulo 2 se explican los parámetros básicos y las técnicas de medida de un sistema de medidas eléctricas. Se muestran las especificaciones técnicas y los modos de funcionamiento de los instrumentos de medida a implementar, así como su conexionado y sus características de funcionamiento.

También se describe la comunicación a través de la interfaz GPIB.

Se describen las diferentes configuraciones de circuitos de medidas que pueden ser realizadas en las aplicaciones de los instrumentos de precisión implementadas.

Se realiza la descripción de los sistemas de medidas basados en el PC.

En el capítulo 3 se describen los pasos seguidos para construir los VIs (Instrumentos Virtuales) que posteriormente se integran en la aplicación final. Se describe la programación basada en subVIs, así como también la programación de bajo nivel utilizada en el desarrollo de los mismos. Se describen la interfaz interactiva de usuario (panel de control) y el diagrama de secuencia (código fuente) común a todos los programas. Se detalla el diagrama de estados utilizado en los programas, así como las estructuras y herramientas empleadas. Se muestran los niveles de jerarquía de los programas en LabView y se expone su programación modular.

En el capítulo 4 se describen los programas desarrollados para cada instrumento de medida bajo la plataforma de programación LabView, así como las aplicaciones específicas que integran cada programa. Quedan descritas las diferentes funciones que tienen los elementos de la interfaz de usuario, aproximando esta descripción a lo que sería un manual de usuario.

Se presentan seis programas. Cinco de ellos son programas modulares correspondientes a cada instrumento de medida (multímetro Agilent 34401A, nanovoltímetro Keithley 182, picoamperímetro Keithley 6487, electrómetro Keithley 6517A y SourceMeter Keithley 2410) y un programa específico que permite el uso combinado de los instrumentos picoamperímetro Keithley 6487, electrómetro Keithley 6517A y Source-Meter Keithley 2410.

En el capítulo 5 se describen los pasos a realizar para la construcción de los archivos auto-ejecutables y que permiten instalar los programas en cualquier ordenador, aunque éste no tenga instalado la plataforma de desarrollo LabView.

En el capítulo 6 se resumen las conclusiones del proyecto y se proponen algunas mejoras al sistema de control y adquisición, en base al trabajo desarrollado en este proyecto.

En el anexo se estimará el coste total del proyecto.



2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INSTRUMENTACIÓN

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INSTRUMENTACIÓN.

2.1. Medidas eléctricas. Elementos de un sistema de medida.

La medida consiste en la determinación de una magnitud por comparación con un estándar. Aunque algunos de nuestros sentidos puedan parecer desarrollados, la percepción y medida de magnitudes físicas no puede realizarse con precisión. La instrumentación comprende todas las técnicas, equipos y metodologías relacionadas con el diseño, la construcción y la aplicación de dispositivos físicos para mejorar, completar y aumentar la eficiencia de los mecanismos de percepción del ser humano.

La propiedad del sistema que se quiere estudiar se almacena en algún tipo de variable eléctrica, generalmente tensión. Esa variable eléctrica, sobre la cual se va a realizar la medida eléctrica, se denomina señal. Según la naturaleza de las señales pueden clasificarse en analógicas, cuando los datos constituyen matemáticamente un conjunto denso, y digitales, cuando los datos constituyen un conjunto finito de valores. Las variables eléctricas pueden ser: carga, corriente, tensión, resistencia, conductancia, capacidad, permitividad dieléctrica, polarización, frecuencia, etc.

Un sistema de medida es aquel cuya finalidad es obtener información acerca de un proceso físico y presentar dicha información en la forma adecuada a un observador o a otro sistema de control. Considerando el sistema de medida como una caja negra, la entrada sería el valor verdadero de la variable a medir y la salida, el valor medido. En un sistema de medida se pueden distinguir tres funciones principales: adquisición, procesamiento y distribución de los datos.

Dentro de la adquisición de los datos se pueden distinguir los siguientes elementos: sensor (la variable del mundo físico es convertida en una señal eléctrica), acondicionamiento de la señal y conversión analógica/digital (A/D). En la función de procesamiento de datos el elemento más importante es el procesador digital de señales. Si es necesario entregar la información de modo analógico aparecen los elementos de conversión D/A y acondicionamiento en la función de distribución de datos. En la figura 2.1 pueden verse en modo esquemático el diagrama en bloque de los elementos de un sistema de medida.

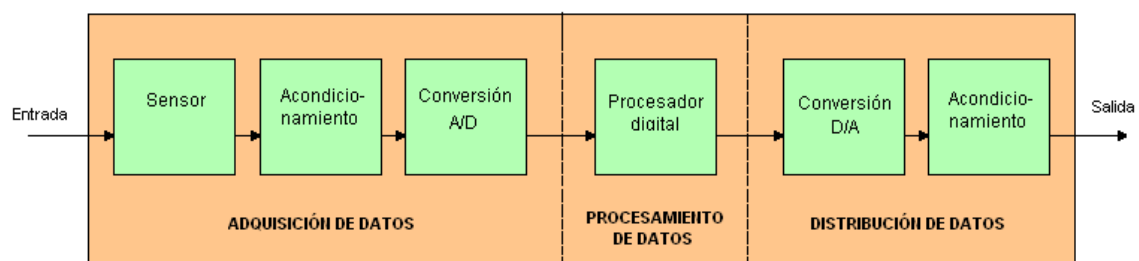


Figura 2.1. Elementos de un sistema de medida.

2.1.1. Requerimientos básicos de una medida. Límites teóricos de una medida eléctrica.

En su forma básica, un sistema de medida incluye un dispositivo bajo test a analizar (DUT) y un dispositivo o instrumento de medida, como se muestra en la figura 2.2.

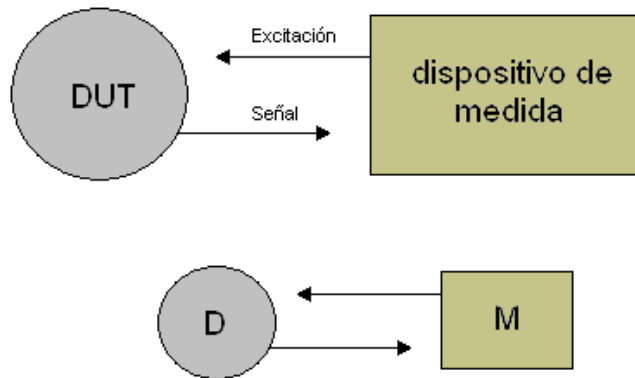


Figura 2.2. Sistema simplificado de un sistema de medida.

El proceso de medida incluye la conversión de los valores analógicos (señal eléctrica a la salida del sensor físico) a valores digitales. Esta conversión A/D es inherente a cada medida digital.

Para simular o controlar la señal medida, el proceso de medida puede incluir la excitación o activación del DUT. Un ejemplo de esta forma de medida es un instrumento modular de mesa midiendo una fuente local de señales eléctricas.

El voltaje en CC (corriente continua), la corriente en CC, y la resistencia son magnitudes eléctricas que son medidas a menudo con multímetros digitales (DMM). Normalmente, estos instrumentos son adecuados para medidas de señales de niveles mayores que $1\mu\text{V}$ ó $1\mu\text{A}$, o por debajo de $1\text{G}\Omega$. Sin embargo, en ocasiones, los multímetros no se encuentran dentro de los límites teóricos de la medida eléctrica, por lo que no la pueden medir correctamente. Para señales de bajo nivel, son necesarios instrumentos más sensibles como electrómetros, picoamperímetros y nanovoltímetros, que puedan realizar medidas de señales por debajo de $1\mu\text{V}$ ó $1\mu\text{A}$, o por encima de $1\text{G}\Omega$.

Por lo tanto, es importante conocer cuáles son los límites teóricos de la señal eléctrica a medir, con el fin de poder emplear el instrumento que mejor se adecúe a esta medida.

El límite teórico de sensibilidad en cualquier medida está determinado por el ruido térmico generado por las resistencias que presenta el circuito. La figura 2.3 muestra los límites teóricos en la medida de tensión, a una temperatura ambiente de 300K , con un tiempo de respuesta de $0,1$ segundo a 10 segundos. Se puede apreciar como la alta resistencia de la fuente limita la sensibilidad teórica de la medida de voltaje.

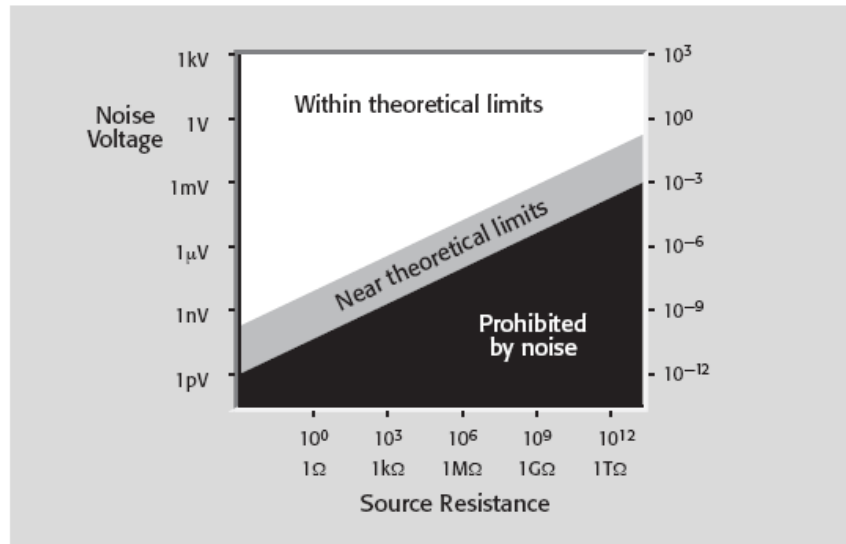


Figura 2.3. Límites teóricos en la medida de tensión

Mientras seguramente es posible medir $1\mu\text{V}$ de señal teniendo una resistencia de fuente de 1Ω , no es posible medir ese mismo nivel de señal de $1\mu\text{V}$ con una resistencia de fuente de $1\text{T}\Omega$. Incluso con una resistencia de fuente mucho menor, de $1\text{M}\Omega$, $1\mu\text{V}$ de señal de medida está muy próximo a los límites teóricos, por lo que sería muy difícil de medir con la utilización de un simple multímetro digital.

2.1.2. Instrumentos de medidas en corriente continua.

Son muchos los instrumentos que permiten realizar medidas en CC. Entre otros se incluyen electrómetros, multímetros digitales, nanovoltímetros, picoamperímetros, unidades SourceMeter, micro-óhmetros, etc. A continuación se comentan las características de los utilizados en este proyecto:

2.1.2.1. Electrómetros.

Son los instrumentos más indicados en medidas de bajo nivel ($<1\mu\text{V}$). Tienen una alta impedancia de entrada que le permite realizar medidas de tensión en condiciones de alta impedancia del DUT. En cuanto a las medidas de corriente, tienen prestaciones similares a las de los picoamperímetros. Contienen elementos auxiliares que les permiten medir resistencias tanto de pequeño como de gran valor, y disponen de circuitos internos capaces de medir carga eléctrica. En general, presentan una capacidad de uso similar a la de los más modernos DMM pero mejorando sus prestaciones en medidas de bajo nivel ($<1\mu\text{V}$), aunque con un coste superior.

En general un electrómetro debería ser usado cuando alguna de las siguientes condiciones de medida se cumpla:

- En rangos de medida no disponible con otros instrumentos, como la medida de corrientes menores que 10nA (10^{-8}A) y la medida de resistencias mayores que $1\text{G}\Omega$ ($10^9\Omega$).

- En medidas de voltaje de resistencia del DUT de 100 MΩ o mayor.
- En medidas de corriente, cuando el potencial de entrada del DUT es menor que 500mV.
- Cuando la medida de carga es necesaria.
- En medición de señales próximas a las limitaciones por ruido térmico.

Por tanto, el empleo del electrómetro es necesario para la caracterización de materiales aislantes y de elevada resistencia (R), garantizando una elevada precisión en medidas de muy baja corriente así como de elevada tensión.

Se emplean esquemas básicos para realizar la medida en bajo nivel utilizando un electrómetro. En la figura 2.4 se muestra el esquema básico para la medida de alta resistencia. Normalmente, este método requiere dos instrumentos: una fuente de tensión externa V_S y un electrómetro o un picoamperímetro. Muchos electrómetros, como el Keithley 6517A, llevan integrada su propia fuente de tensión que le permite medir resistencias directamente.

Este esquema es válido también en el caso de utilizar un único instrumento como un SourceMeter (por ejemplo el Keithley 2410), que permite medir resistencias directamente ya que incorporan una fuente interna.

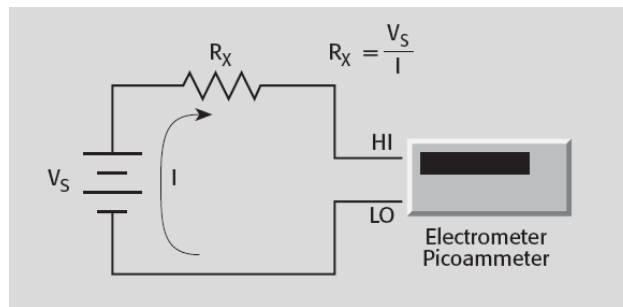


Figura 2.4. Medida de alta resistencia utilizando un electrómetro.

El electrómetro que se automatiza en este proyecto es el Keithley 6517A.

En particular, el electrómetro Keithley 6517A, tiene una serie de funciones integradas que funcionan a modo de aplicaciones y que se constituyen en base a secuencias de prueba, entre las cuales, podemos destacar las mostradas en la tabla 2.1. En esta tabla, se muestra el tipo de prueba a realizar indicando los parámetros de entrada que son necesarios introducir para su ejecución, así como los parámetros de salida que éste proporciona.

<i>Tipo de prueba</i>	<i>Parámetros de entrada</i>	<i>Parámetros de salida</i>
1. Corriente de fuga del diodo	Voltaje de comienzo, el voltaje de parada, el voltaje de paso y el tiempo de retraso	Corriente medida
2. Corriente de fuga del condensador	Voltaje de polarización, número de lecturas y el intervalo de tiempo	Corriente medida
3. Resistencia de aislamiento de cable	Voltaje de polarización, número de lecturas y intervalo de tiempo	Valores de resistencias

4. Coeficiente de voltaje	Valor del voltaje 1, valor del voltaje 2, tiempo de retraso 1 y tiempo de retraso 2	Coef. de voltaje (porcentaje de cambio en R por voltio)
5. Resistencia de superficie	Tiempo de pre-descarga (tiempo previo), voltaje y tiempo de polarización, voltaje y tiempo de medida y tiempo de descarga	La resistencia medida
6. Resistencia de volumen	Tiempo de pre-descarga (tiempo previo), voltaje y tiempo de polarización, voltaje y tiempo de medida y tiempo de descarga	La resistencia medida
7. Método de polaridad alterna	Voltaje de offset, voltaje de alternancia, tiempo de medida, número de medidas a descartar y número de medidas a almacenar	Valor de resistencia final
8. Barrido en onda cuadrada	Nivel alto de voltaje, nivel bajo de voltaje, tiempo en alto nivel, tiempo en bajo nivel y número de ciclos de la onda cuadrada	Voltaje, corriente o resistencia
9. Barrido en escalera (rampa)	Voltaje de comienzo, voltaje de parada, voltaje de paso (incremento de voltaje) y tiempo de paso	Voltaje, corriente o resistencia

Tabla 2.1. Funciones de prueba del electrómetro Keithley 6517A.

En este proyecto se realiza la automatización de estas aplicaciones a través de una interfaz de usuario, como se expondrá en el apartado 4.1.4.3.

2.1.2.2. Multímetro digital (DMM).

Son los instrumentos más populares puesto que permiten realizar medidas tanto de tensión como de corriente y resistencia con coste reducido, y con una precisión y sensibilidad adecuadas en la mayoría de los casos. Sin embargo, su impedancia de entrada no es suficientemente buena en caso de medidas en condiciones de alta impedancia.

Los DMM más sensibles se utilizan para medir voltaje en CC de hasta 10nV, valores de intensidad en CC de hasta 10pA y medida de resistencias de hasta 1GΩ.

Se emplean esquemas básicos para realizar la medida utilizando un DMM. En la figura 2.5 se muestra el esquema básico que permite la medida de un DUT de alta resistencia combinando una fuente de corriente y un DMM. Si la fuente de corriente presenta un amplificador operacional A de ganancia unidad (buffer), un DMM puede ser utilizado como voltímetro de baja impedancia para medir el voltaje de la resistencia R_x .

La mayoría de los multímetros digitales incluyen las siguientes funciones de medida: voltaje en CC, voltaje en CA (corriente alterna), corriente en CC, corriente en CA y óhmetro.

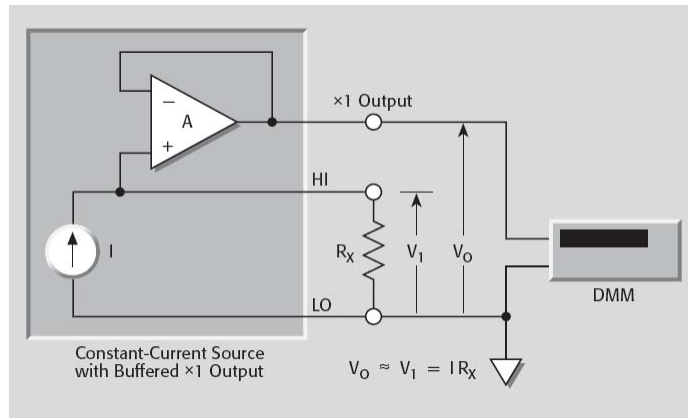


Figura 2.5. Medida de alta resistencia con la utilización de un DMM.

El multímetro digital que se automatiza en este proyecto es el Agilent 34401A.

2.1.2.3. Nanovoltímetros.

Un nanovoltímetro integra un sistema de medida de voltaje muy sensible. Se utilizan para medida de pequeñas tensiones en condiciones de baja resistencia del DUT, presentando una impedancia de entrada comparable a la de un multímetro convencional. Debido a su sensibilidad en la medida de voltaje, puede detectar valores tan bajos como 1pV.

Los nanovoltímetros se emplean en la caracterización de materiales superconductores donde es necesario medir diferencias de potencial muy bajas cuando la resistencia tiende a cero.

Se emplean esquemas básicos para realizar la medida utilizando un nanovoltímetro. En la figura 2.6 se muestra el esquema básico para la medida de voltaje en el caso de un DUT de baja resistencia. Para eliminar la resistencia debida a los contactos se utiliza el método de cuatro puntas, que se estudiará con detalle en el apartado 2.4.2.2. Este método es importante en medidas donde la resistencia del material es del orden de la resistencia de los contactos o menor. Además, para evitar la influencia de los efectos termoeléctricos en las soldaduras de los contactos, este proceso se repite en cada punto de medida invirtiendo el sentido de la corriente, para así hallar un promedio de los valores de la resistencia, como se explicará posteriormente en el apartado 2.4.2.1.

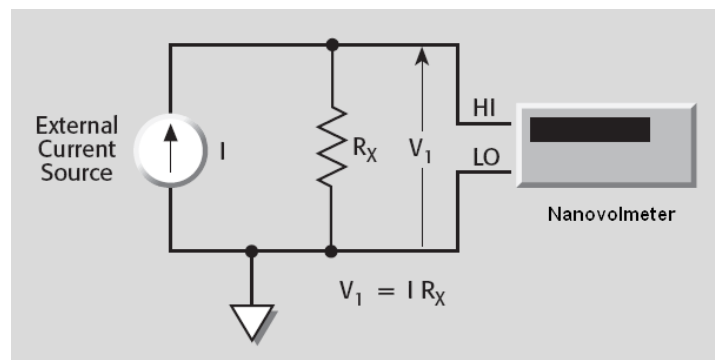


Figura 2.6. Esquema para la medida de baja resistencia utilizando un nanovoltímetro.

El nanovoltímetro que se automatiza en este proyecto es el Keithley 182.

2.1.2.4. Picoamperímetros.

Un picoamperímetro es un amperímetro constituido a partir de la función de sistema de medida de corriente de un electrómetro. Son necesarios cuando se quieren realizar medidas de pequeñas corrientes. Por tanto, son utilizados para la medida de resistencia en el DUT a caracterizar, donde es necesaria la detección de señales de muy baja intensidad.

Se emplean esquemas básicos para realizar la medida en bajo nivel utilizando un picoamperímetro. En la figura 2.4 se muestra el esquema básico para la medida de alta resistencia. Normalmente, este método requiere dos instrumentos: una fuente de tensión externa V_S y un picoamperímetro o un electrómetro. Muchos picoamperímetros, como el Keithley 6487, llevan integrada su propia fuente de tensión que le permite medir resistencias directamente.

El picoamperímetro que se automatiza en este proyecto es el Keithley 6487.

2.1.2.5. Fuente integrada en el instrumento de medida (SMU). SourceMeter.

Los “SMU” son instrumentos diseñados para resolver problemas en medidas de bajo nivel debido a su gran versatilidad de uso. Integra un sistema de medida de tensión, otro de corriente, una fuente programable de tensión y otra de corriente con prestaciones comparables o superiores a las de los electrómetros. Se pueden utilizar de modo independiente y también simultáneamente (voltímetro y fuente de corriente o amperímetro y fuente de tensión).

Los “SourceMeter” son instrumentos similares a los SMU, que además pueden monitorizar directamente los valores de resistencia, como también los de voltaje y corriente. Como en el caso de los SMU, pueden realizar rampas y otras programaciones sobre la fuente.

Cuando el SourceMeter se configura en fuente de corriente, como se muestra en la figura 2.7, el instrumento funciona con una alta impedancia de entrada como fuente de corriente, con la capacidad de voltaje limitada y pudiendo medir corriente, voltaje o resistencia. Al estar estas funciones integradas en un solo instrumento se simplifica el sincronismo y conexiones, normalmente más complicado cuando se trabaja con instrumentos independientes.

Para medidas de resistencia, la selección entre medición a dos puntas o a cuatro puntas determina como ha de realizarse la medida. A dos puntas, el voltaje es medido con los terminales “Input/Output” del instrumento. A cuatro puntas, el voltaje es medido directamente en el DUT usando los terminales “sense”, eliminando así caídas de tensión debidas a la resistencia de los contactos, como se estudiará con detalle en el apartado 2.4.2.2.2.

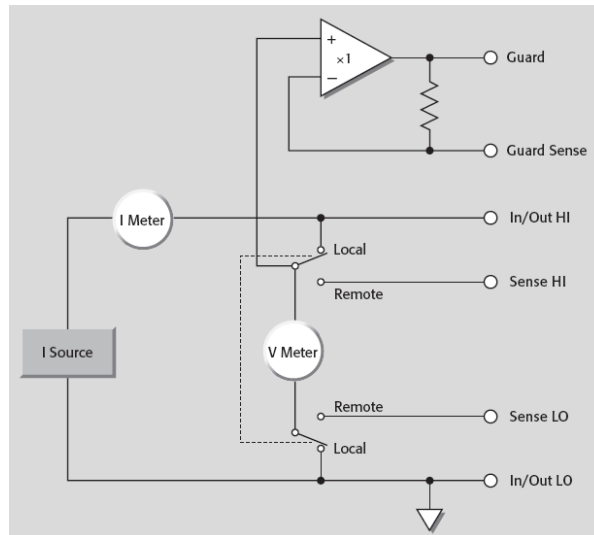


Figura 2.7. Modo de fuente de corriente de un SourceMeter.

Cuando el SourceMeter es configurado como fuente de voltaje, como se muestra en la figura 2.8, el instrumento trabaja con una baja impedancia de entrada, con la capacidad de corriente limitada y pudiendo medir corriente, voltaje o resistencia.

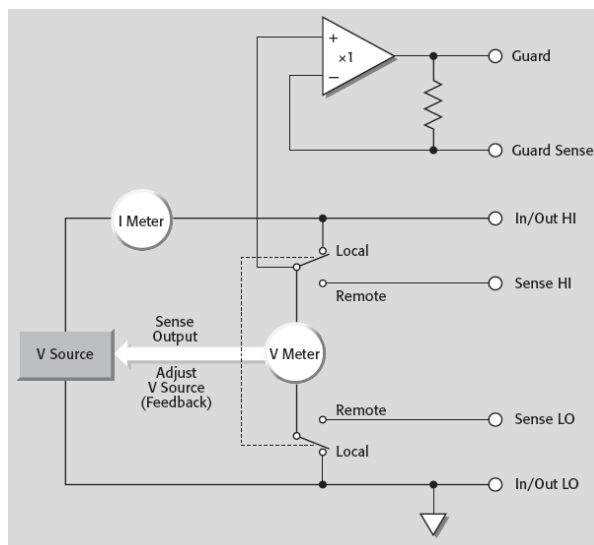


Figura 2.8. Modo de fuente de tensión para un SourceMeter.

El esquema básico para la medida de alta resistencia mostrado en la figura 2.4 es válido también en el caso de utilizar un único instrumento como el SourceMeter, que permite medir resistencias directamente ya que incorporan una fuente interna.

El SourceMeter que se automatiza en este proyecto es el modelo Keithley 2410.

Una determinada medida se puede realizar con más de un tipo de instrumento, sin embargo, la elección del más adecuado depende de las condiciones particulares de cada prueba o medida a realizar. En la figura 2.9 puede verse representado un esquema de los principales instrumentos de medida en función de su rango de medición y de la magnitud a determinar.

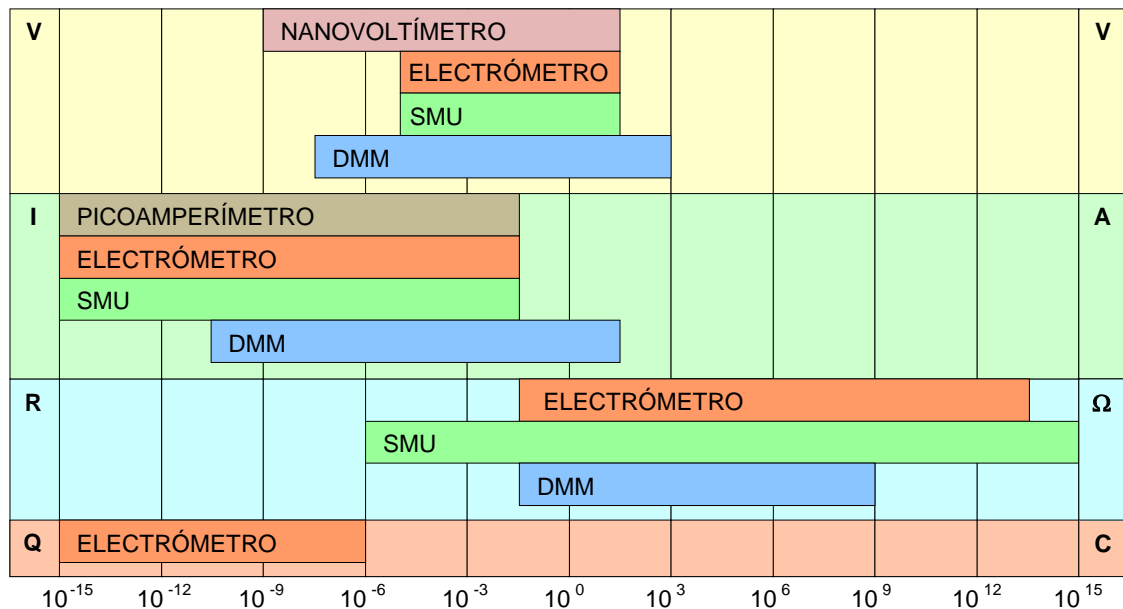


Figura 2.9. Rango de medición de los instrumentos de alta precisión.

2.1.3. Funcionalidad de un sistema de medidas eléctricas.

La precisión, la exactitud, la velocidad, el ruido son elementos que constituyen la funcionalidad de un sistema de medidas eléctricas.

Nuestro plan del sistema de medida debe contener los siguientes pasos:

- Identificar y priorizar los parámetros funcionales críticos.
- Entender las necesidades de precisión.
- Generar una previsión de error y tiempo.
- Analizar las especificaciones técnicas con rigor.

Definir los parámetros de funcionamiento críticos nos servirá en la toma de decisiones del diseño del sistema final de medida. En el caso de presentarse incompatibilidades, se debe dar prioridad a estos requerimientos funcionales.

2.1.3.1. Elementos que afectan a la funcionalidad.

Entre los elementos que afectan a la funcionalidad del sistema, y que evitan el deterioro de la señal a medir o controlar, destacan:

- Las especificaciones técnicas de los instrumentos empleados.
- La configuración de la instrumentación.
- La contaminación de la señal antes de que alcance el instrumento.
- El conexionado aplicado al sistema.
- El tipo de cableado utilizado.
- La conmutación entre componentes del sistema.
- El software de desarrollo empleado.

Se debe realizar un diseño cuidadoso del sistema de medida para dar como resultado unas especificaciones cercanas a las limitaciones del instrumento.

Como se comenta en el apartado anterior, es amplia la gama de instrumentos que están disponibles en el mercado y a menudo su funcionalidad se solapa, por lo que hay que prestar importancia a la selección de los instrumentos de medida con arreglo a los requerimientos del sistema.

Las especificaciones técnicas de los instrumentos de precisión incorporados al sistema serán descritas en este apartado.

2.1.3.2. Especificaciones técnicas de los instrumentos modulares de precisión que forman parte del sistema de medidas eléctricas.

A continuación se describen las características técnicas de los instrumentos objeto de la automatización en este proyecto.

2.1.3.2.1 Nanovoltímetro Keithley 182.

El nanovoltímetro Keithley 182 dispone de un rango de lectura de voltaje que va desde los 3mV hasta los 30V, como se puede apreciar en la tabla 2.2, donde se muestran además, las lecturas máximas en función de la resolución.

La precisión que proporciona este instrumento según el rango de medida dependerá de la resolución seleccionada, como se muestra en la tabla 2.3.

La principal función de este instrumento es medir pequeños voltajes con gran precisión. En nuestro proyecto se desarrollará una interfaz que permita al usuario utilizarlo de modo remoto y obtener un mejor rendimiento del instrumento. En nuestro sistema de medida en particular, es utilizado para medir los potenciales a la salida de los termopares tipo K ($\sim\mu\text{V}$).

Range	Display Resolution			
	3 1/2d	4 1/2d	5 1/2d	6 1/2d
3mV	±3.029mV	±3.0299mV	±3.02999mV	±3.029999mV
30mV	±30.29mV	±30.299mV	±30.2999mV	±30.29999mV
300mV	±302.9mV	±302.99mV	±302.999mV	±302.9999mV
3V	±3.029V	±3.0299V	±3.02999V	±3.029999V
30V	±30.29V	±30.299V	±30.2999V	±30.29999V

Tabla 2.2. Lecturas máximas del instrumento Keithley 182.

Range	Display Resolution			
	3 1/2d	4 1/2d	5 1/2d	6 1/2d
3mV	1μV	100nV	10nV	1nV
30mV	10μV	1μV	100nV	10nV
300mV	100μV	10μV	1μV	100nV
3V	1mV	100μV	10μV	1μV
30V	10mV	1mV	100μV	10μV

Tabla 2.3. Precisión en función del rango y la resolución del instrumento Keithley 182.

- *Panel frontal del nanovoltímetro Keithley 182*

La figura 2.10 muestra el panel frontal del instrumento Keithley 182.

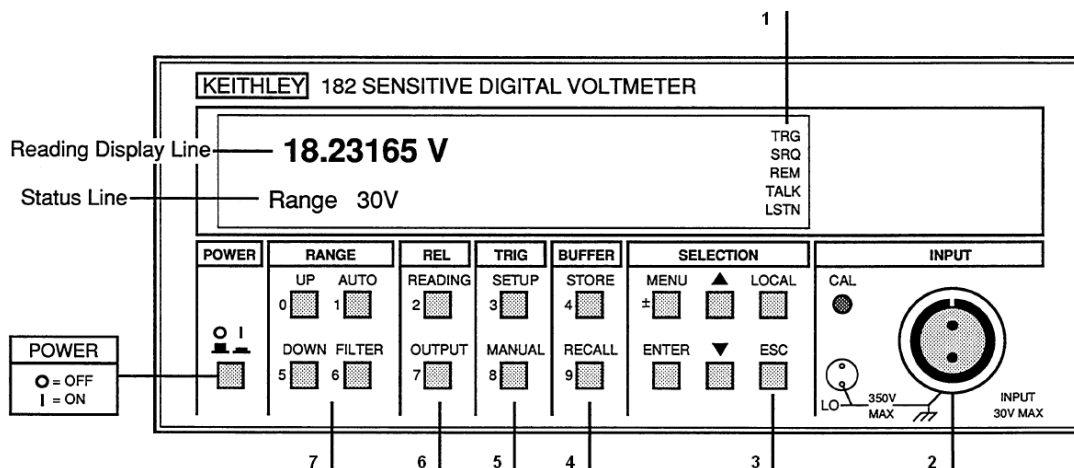


Figura 2.10. Panel frontal del nanovoltímetro Keithley 182.

Además del botón de encendido/apagado (power) y la pantalla, donde se muestra la medida y el estado, el nanovoltímetro presenta los siguientes elementos:

1. Indicador de estado de comunicación en el bus IEEE-488.
2. Terminal de entrada. Se le acopla una sonda específica. El máximo valor de voltaje que se le puede aplicar a la entrada corresponde con 35V de continua, 120V durante 10 segundos. Exceder estos niveles puede causar daño al instrumento. El voltaje en modo común máximo (voltaje entre la entrada LO y la tierra del chasis) es de 350V de pico.

3. Teclas de selección.
4. Teclas para almacenamiento (buffer).
5. Teclas de disparo.
6. Función de lectura relativa.
7. Función de rango.

La referencia específica correspondiente a cada botón se describe en el manual de usuario del instrumento (Ref. [5]).

- Panel trasero del nanovoltímetro Keithley 182

La figura 2.11 muestra el panel trasero del instrumento Keithley 182.

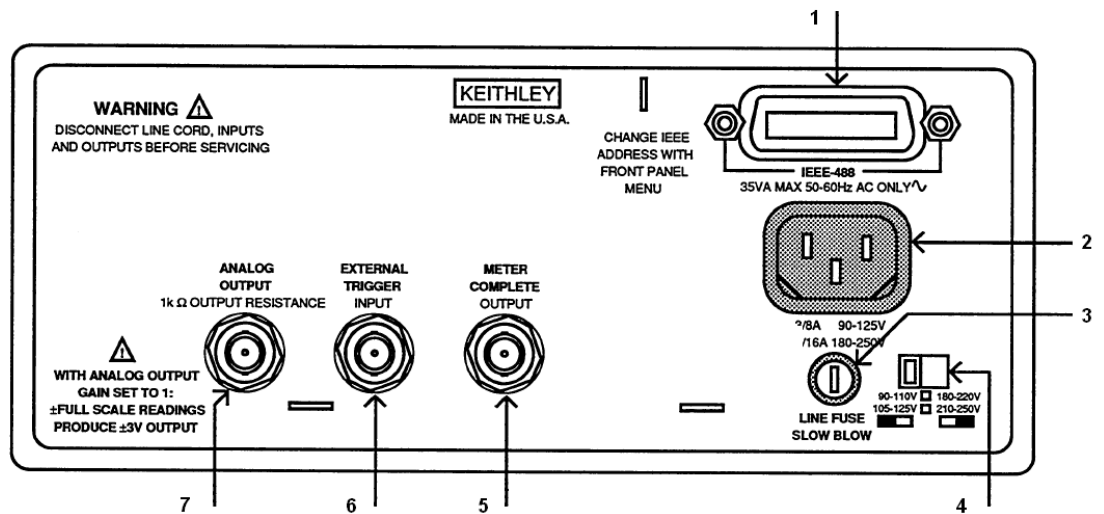


Figura 2.11. Panel trasero del nanovoltímetro Keithley 182.

En su parte trasera, el nanovoltímetro presenta los siguientes elementos:

1. Conector IEEE-488. El nanovoltímetro presenta un bus de comunicación basado en el estándar IEEE-488. Para comunicar con el PC se utilizará una tarjeta GPIB, como se describirá más adelante.
2. Entrada de línea de alimentación.
3. Fusible del instrumento.
4. Selector del voltaje de línea.
5. Salida de medida completada. Utiliza un conector BNC.
6. Entrada de disparo externo. Emplea un conector BNC.
7. Conector BNC para la salida analógica.

2.1.3.2.2. Multímetro digital Agilent 34401A.

El multímetro digital Agilent 34401A permite realizar medidas tanto de tensión como de corriente y resistencia con coste reducido, y con una precisión y sensibilidad adecuadas en la mayoría de los casos.

En nuestro proyecto se desarrollará una interfaz que permita al usuario utilizarlo de modo remoto y obtener rendimiento de las prestaciones del instrumento.

A continuación se detallan los distintos tipos de medida de este instrumento:

- Medida de voltaje:
Rangos: 100mV, 1V, 10V, 100V, 1000V (750Vca).
Resolución máxima: 100nV (en rango de 100mV).
- Medida de corriente:
Rangos: 10mA (sólo cc), 100mA (sólo cc), 1 A, 3 A.
Resolución máxima: 10nA (en rango de 10mA).
- Medida de resistencia:
Rangos: 100Ω, 1 KΩ, 10KΩ, 100 KΩ, 1MΩ, 10MΩ, 100MΩ.
Resolución máxima: 100 μΩ (en rango de 100 Ω).
- Medida de frecuencia:
Banda de medida: de 3 Hz a 300kHz.
Rango de señal de entrada: de 10mVca a 750Vca.
- Medida de período:
Banda de medida: de 0,33 segundos a 3,3 μsegundos.
Rango de señal de entrada: de 10mVca a 750Vca.
- Continuidad:
Fuente de corriente de prueba: 1mA.
Resolución máxima: 0,1Ω (el rango está fijado en 1KΩ).
- Comprobación de diodos:
Fuente de corriente de prueba: 1mA.
Resolución máxima: 100μV (el rango está fijado en 1Vcc).

- *Panel frontal del multímetro Agilent 34401A*

La figura 2.12 muestra el panel frontal del instrumento Agilent 34401A.

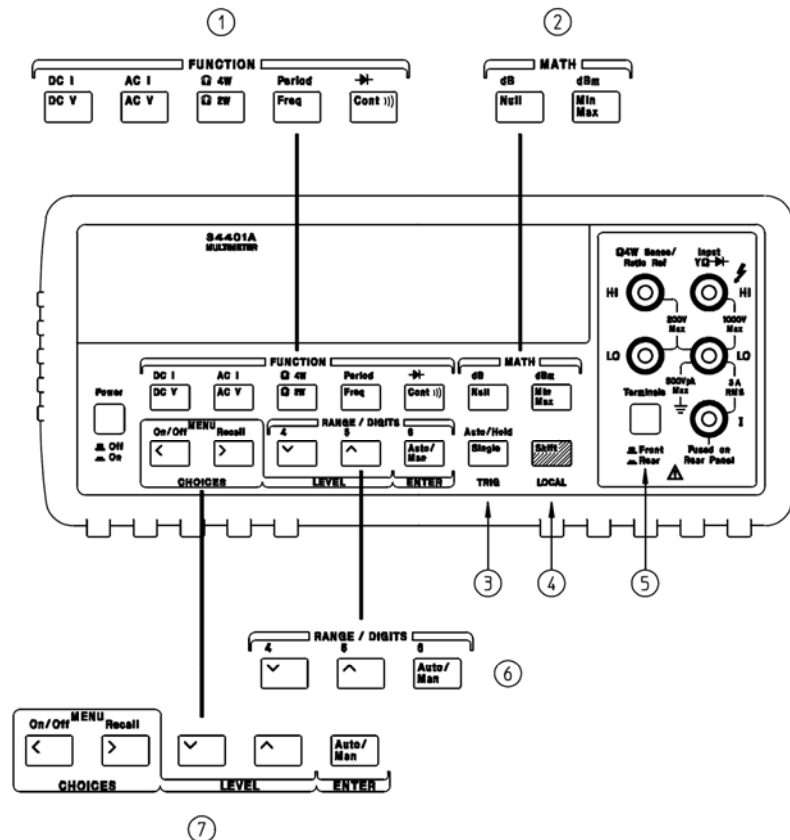


Figura 2.12. Panel frontal del multímetro Agilent 34401A.

Además del botón de encendido/apagado (power), la pantalla y los terminales de entrada del instrumento, el multímetro presenta los siguientes elementos:

1. Teclas de función de medidas: mediante estas teclas se puede seleccionar entre los distintos tipos de medida que puede realizar el instrumento.
2. Teclas de operaciones matemáticas.
3. Tecla de disparo.
4. Tecla de modo local.
5. Conmutador del terminal de entrada frontal o posterior.
6. Teclas de rango y resolución.
7. Teclas de funcionamiento de menú.

La referencia específica correspondiente a cada botón se describe en el manual de usuario del instrumento (Ref. [9]).

- *Panel trasero del multímetro Agilent 34401A*

La figura 2.13 muestra el panel trasero del instrumento Agilent 34401A.

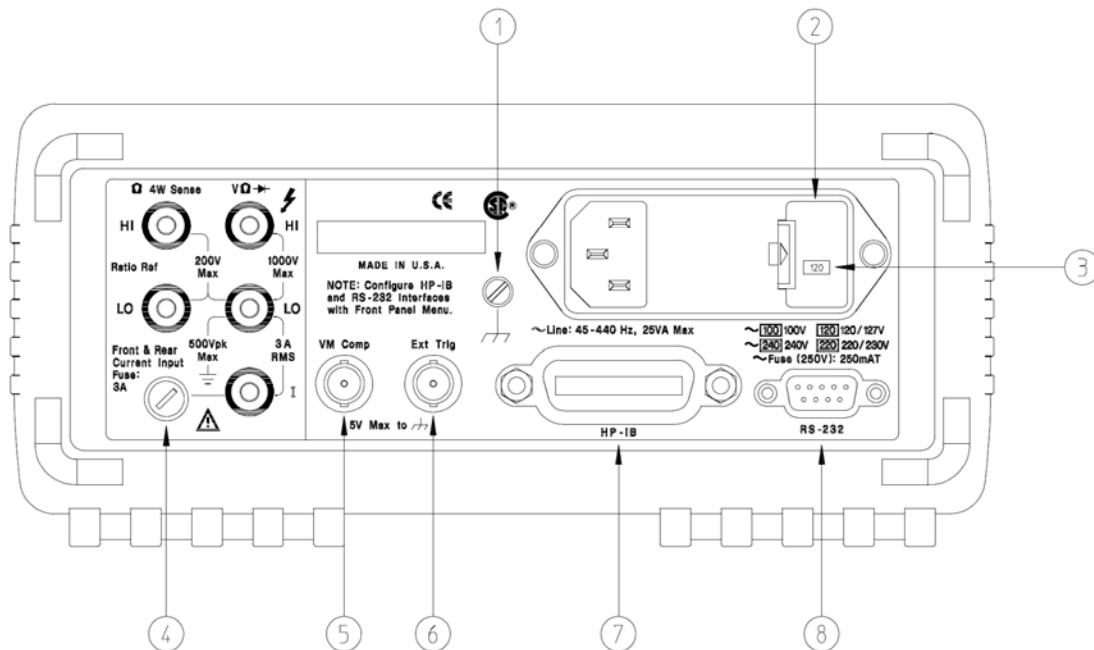


Figura 2.13. Panel trasero del multímetro Agilent 34401A.

Además de los terminales de entrada posteriores del instrumento, el panel trasero del multímetro presenta los siguientes elementos:

1. Masa del chasis.
2. Ensamblaje de sujeción de los fusibles de alimentación de línea.
3. Configuración de voltaje de línea.
4. Fusible de entrada de corriente frontal y posterior.
5. Terminal de salida del voltímetro completo.
6. Terminal de entrada de disparo externo.
7. Conector de la interface GPIB (IEEE-488).
8. Conector de la interface RS-232.

2.1.3.2.3. Picoamperímetro Keithley 6487.

El picoamperímetro Keithley 6487 permite medidas de corriente y de resistencia. Este instrumento incorpora una fuente de tensión. La medida de resistencia queda asociada al uso obligatorio de su fuente y su valor es calculado a partir de la medida de corriente y el valor de tensión suministrado al DUT ($R=V/I$).

El rango de medición de corriente varía entre 2nA y 20mA, proporcionándose una precisión de 10fA hasta 100nA, respectivamente, como se puede apreciar en la tabla 2.4. La fuente de tensión presente en el picoamperímetro permite valores de $\pm 500V$. Sus propiedades se detallan en la tabla 2.5.

Este instrumento es utilizado principalmente para medir pequeñas corrientes con gran precisión. En nuestro proyecto se desarrollará una interfaz que permita al usuario utilizarlo de modo remoto y obtener un mejor rendimiento de las prestaciones del instrumento.

Range	Maximum Reading	5½ -Digit Resolution
2nA	$\pm 2.1nA$	10fA
20nA	$\pm 21nA$	100fA
200nA	$\pm 210nA$	1pA
2uA	$\pm 2.1\mu A$	10pA
20uA	$\pm 21\mu A$	100pA
200uA	$\pm 210\mu A$	1nA
2mA	$\pm 2.1mA$	10nA
20mA	$\pm 21mA$	100nA

Tabla 2.4. Lecturas máximas y precisión del picoamperímetro Keithley 6487 en función del rango de medida.

Range	Maximum Output	Step Size
10V	$\pm 10.1V$	200 μV
50V	$\pm 50.5V$	1mV
500V	$\pm 505V$	10mV

Tabla 2.5. Máxima salida y tamaño del paso en función del rango para la fuente de tensión presente en el instrumento Keithley 6487.

- Panel frontal del picoamperímetro Keithley 6487

La figura 2.14 muestra el panel frontal del instrumento Keithley 6487.

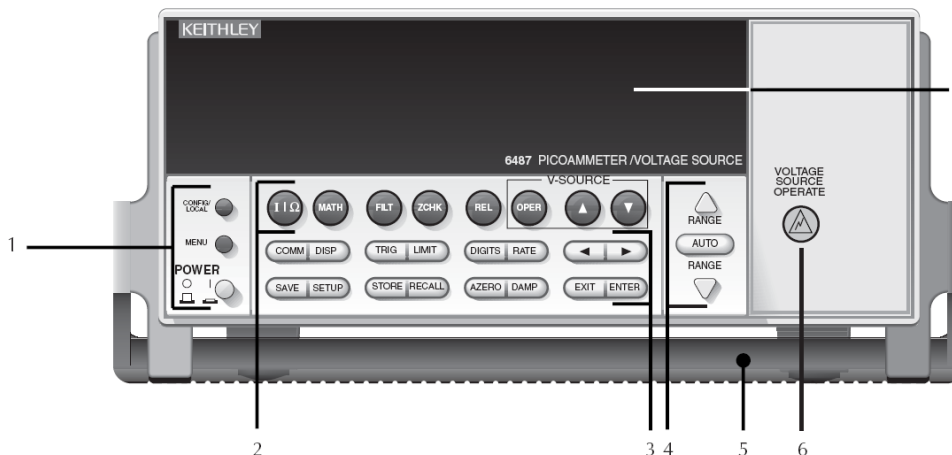


Figura 2.14. Panel frontal del picoamperímetro Keithley 6487.

Los elementos que componen el panel frontal del picoamperímetro Keithley 6487 se detallan a continuación:

1. Teclas de menú, local y configuración. Interruptor de encendido/apagado (power).
2. Teclas de función.
3. Teclas de operación.
4. Teclas de rango.
5. Asa del instrumento.
6. Indicador de operación de fuente de voltaje.
7. Pantalla del instrumento.

La referencia específica correspondiente a cada botón se describe en el manual de usuario del instrumento (Ref. [7]).

- Panel trasero del picoamperímetro Keithley 6487

La figura 2.15 muestra el panel trasero del instrumento Keithley 6487.

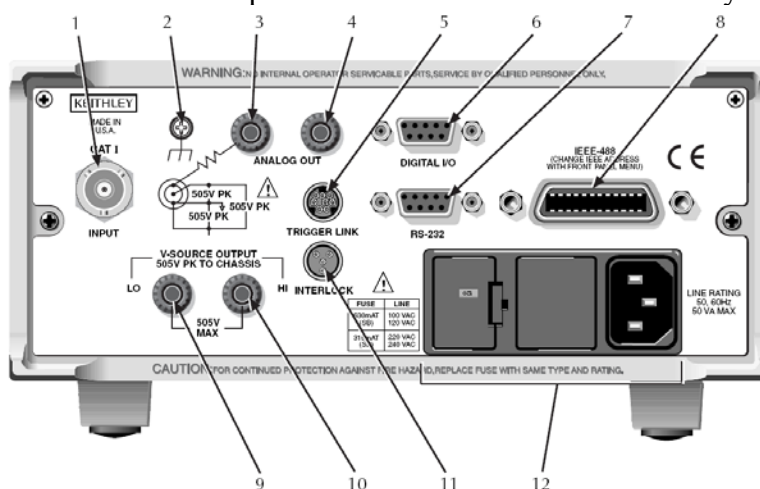


Figura 2.15. Panel trasero del picoamperímetro Keithley 6487.

El panel trasero del picoamperímetro Keithley 6487 presenta los siguientes elementos:

1. INPUT. El conector de entrada, que únicamente está presente en el panel trasero del instrumento, es un conector hembra de tres puntas tipo triax y es utilizado para acoplar la sonda de entrada mediante un conector triax macho.
2. Terminal de conexión del chasis a tierra.
3. Este conector banana puede ser usado como una entrada LO o como el común para la salida ANALOG OUT. También puede ser usado como toma de tierra. Observe que hay una resistencia de $1k\Omega$ en la entrada LO desde el común de ANALOG OUT.
4. ANALOG OUT. Salida analógica. Utiliza un conector banana.
5. TRIGGER LINK. Conector de ocho pines micro-DIN utilizado para enviar y recibir pulsos del trigger entre los instrumentos conectados. Utiliza un cable o adaptador trigger, como los modelos 8501-1, 8501-2, 8502, y 8503.
6. DIGITAL I/O. Entradas/salidas digitales. Utiliza un conector macho DB-9.
7. Bus RS-232. Conector hembra DB-9 para operaciones RS-232.
8. Bus IEEE-488. Conector para operaciones IEEE-488 (GPIB). Utiliza un cable apantallado, como los modelos 7007-1 y 7007-2.
9. V-SOURCE OUTPUT LO. Conector banana que proporciona una conexión LO a la fuente de voltaje del picoamperímetro.
10. V-SOURCE OUTPUT HI. Conector banana que proporciona una conexión HI a la fuente de voltaje del picoamperímetro.
11. INTERLOCK. Conector de bloqueo para altas tensiones de la fuente de voltaje.
12. Power Module. Se encuentran el terminal de conexión de tensión de alimentación y los fusibles. El instrumento puede ser configurado para tensiones de línea de 115Vca y 230Vca (nominales) y con frecuencias de línea de 50 ó 60Hz automáticamente.

2.1.3.2.4. *Electrómetro Keithley 6517A.*

El electrómetro Keithley 6517A permite medidas de voltaje, corriente, resistencia, resistividad y carga. Este instrumento incorpora una fuente de tensión. Puede realizar medidas de voltaje desde $1\mu V$ hasta 210 V y medidas de corriente de 10aA a 21mA. Sus rangos de medida y precisión respectivos pueden verse en las tablas 2.6 y 2.7.

Este instrumento es utilizado principalmente para medir pequeñas corrientes y altas resistencias con gran precisión. En nuestro proyecto se desarrollará una interfaz que permita al usuario utilizarlo de modo remoto y obtener rendimiento de las prestaciones del instrumento.

RANGE	5½ DIGIT RESOLUTION
2 V	10 μV
20 V	100 μV
200 V	1 mV

Tabla 2.6. Rangos del electrómetro Keithley 6517A para medidas de voltaje.

RANGE	5½ DIGIT RESOLUTION
20 pA	100 aA
200 pA	1 fA
2 nA	10 fA
20 nA	100 fA
200 nA	1 pA
2 μA	10 pA
20 μA	100 pA
200 μA	1 nA
2 mA	10 nA
20 mA	100 nA

Tabla 2.7. Rangos del electrómetro Keithley 6517A para medidas de corriente.

Además, este instrumento permite realizar medidas de resistencia y resistividad (superficie y volumen). En este caso es necesaria la utilización de su fuente de tensión para excitar el DUT. Es posible medir valores de resistencia de dos formas distintas:

- Auto: en el modo de lectura de resistencia auto (hasta $10^{17}\Omega$) el instrumento 6517A ajusta automáticamente un nivel de tensión óptimo, ya sea 40V ó 400V. El rango de ohmios que se puede seleccionar para este tipo de medidas se muestra en la tabla 2.8.
- Manual: cuando se requiere precisar un nivel de voltaje es necesario utilizar el modo de lectura de resistencia manual (hasta $10^{18}\Omega$). En modo manual, el valor de resistencia es calculado con el rango de la medida de corriente (véase la tabla 2.7) a partir del valor de tensión introducido.

RANGE	5½ DIGIT RESO- LUTION
2 MΩ	10 Ω
20 MΩ	100 Ω
200 MΩ	1 kΩ
2 GΩ	10 kΩ
20 GΩ	100 kΩ
200 GΩ	1 MΩ
2 TΩ	10 MΩ
20 TΩ	100 MΩ
200 TΩ	1 GΩ

Tabla 2.8. Rangos del electrómetro Keithley 6517A para medidas de resistencias en modo auto.

El electrómetro presenta varios rangos de culombios para resolver medidas de carga desde 10fC (10^{-14}C) hasta $2.1\mu\text{C}$, como se aprecia en la tabla 2.9.

RANGE	5½ DIGIT RESOLUTION
2 nC	10 fC
20 nC	100 fC
200 nC	1 pC
2 μ C	10 pC

Tabla 2.9. Rangos del electrómetro Keithley 6517A para medidas de carga.

La construcción interna del electrómetro permite utilizar su fuente de voltaje con 1W de potencia. Se permiten valores de $\pm 1000V$. En la tabla 2.10 se pueden apreciar sus características en función de los dos rangos de voltaje que permite.

Range	Maximum output		Step size
	Voltage	Current	
100V	$\pm 100V$	$\pm 10mA$	5mV
1000V	$\pm 1000V$	$\pm 1mA$	50mV

Tabla 2.10. Rangos del electrómetro Keithley 6517A para el voltaje de fuente.

Este instrumento lleva integrada la función de medida de temperatura. Para realizar medidas de temperatura se debe conectar un termopar tipo K, modelo 6517-TP, gracias al cual, el electrómetro realiza medidas de temperatura en el rango de $-25^{\circ}C$ a $1500^{\circ}C$, como se puede apreciar en la tabla 2.11.

THERMOCOUPLE TYPE	RANGE
K	$-25^{\circ}C$ to $1500^{\circ}C$

Tabla 2.11. Rangos del electrómetro Keithley 6517A para medidas de temperatura.

- Panel frontal del electrómetro Keithley 6517A

La figura 2.16 muestra el panel frontal del instrumento Keithley 6517A.

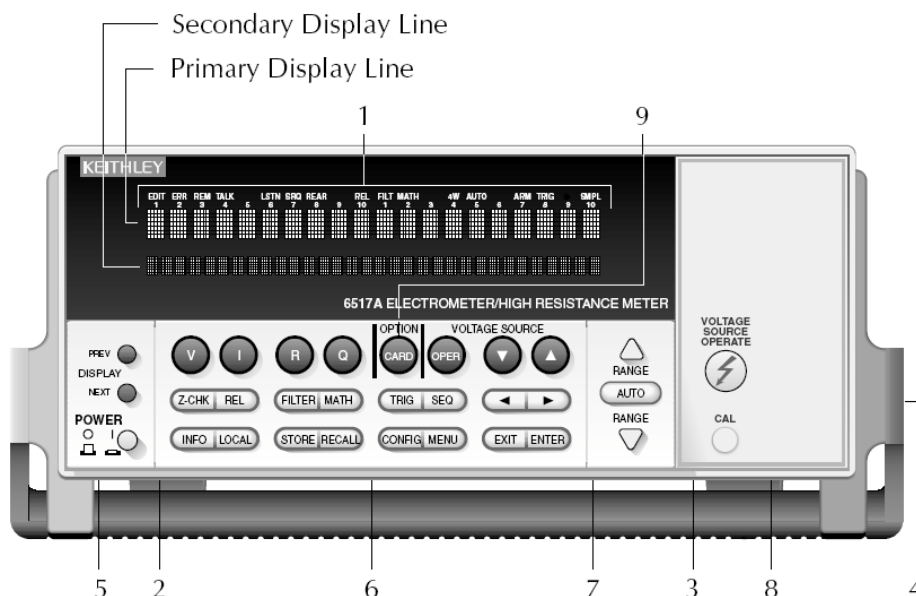


Figura 2.16. Panel frontal del electrómetro Keithley 6517A.

Además del botón de encendido/apagado (power) y la pantalla, que dispone de dos líneas de display, una primaria y otra secundaria, el electrómetro 6517A presenta los siguientes elementos:

1. Indicadores de estado.
2. Teclas de funciones de medida.
3. Teclas de rango.
4. Asa del instrumento.
5. Teclas de pantalla.
6. Teclas de operación.
7. Teclas de la fuente de voltaje.
8. Indicador de operación de la fuente de voltaje.
9. Tecla de tarjeta de opción.

La referencia específica correspondiente a cada botón se describe en el manual de usuario del instrumento (Ref. [8]).

- Panel trasero del electrómetro Keithley 6517A

La figura 2.17 muestra el panel trasero del instrumento Keithley 6517A.

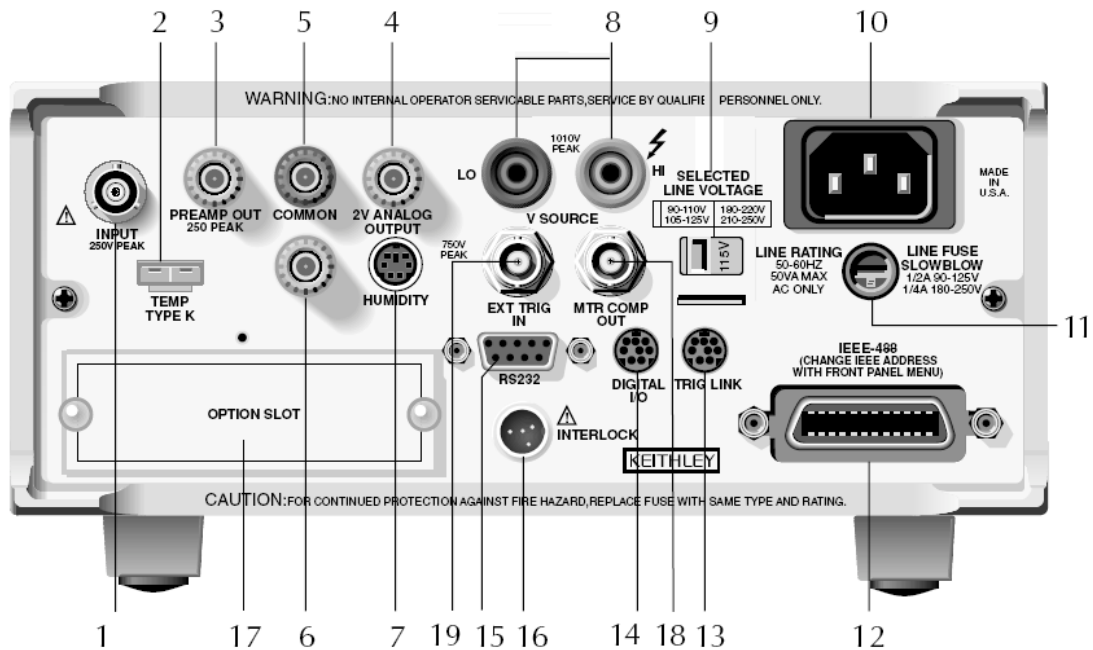


Figura 2.17. Panel trasero del electrómetro Keithley 6517A.

El panel trasero del electrómetro Keithley 6517A presenta los siguientes elementos:

1. INPUT. El conector de entrada, que únicamente está presente en el panel trasero del instrumento, es un conector hembra de tres puntas tipo triax y es utilizado para acoplar la sonda de entrada mediante un conector triax macho.
2. TEMP TYPE K. Para realizar medidas de temperatura se debe conectar un termopar tipo K, modelo 6517-TP.

3. PERAMP OUT. Sigue a la amplitud de la señal aplicada al terminal de entrada. Con guarda activa, PREAMP OUT está conectado internamente a la estructura interna del conector triax de entrada para configurar la entrada de medidas de voltios con guarda.
4. 2V ANALOG OUTPUT. Borne que proporciona una escala de 0 a 2V de salida referenciada al COMMON.
5. COMMON. Borne que está conectado internamente a INPUT LO por una resistencia de $0,6\Omega$.
6. Borne que conecta el chasis a tierra.
7. HUMIDITY. Para medidas de humedad relativa con la sonda 6517-RH.
8. V-SOURCE: HI, LO. Conector tipo banana para la fuente de voltaje.
9. LINE VOLTAGE SWITCH. Interruptor para la tensión de línea del instrumento.
10. POWER LINE INPUT. Conectar a la línea de alimentación.
11. LINE FUSE. Fusible de acción lenta.
12. IEEE-488 CONECTOR. Conector para operaciones IEEE-488 (GPIB). Utiliza un cable apantallado para IEEE-488.
13. TRIG LINK. Conector de ocho pines micro-DIN utilizado para enviar y recibir pulsos del trigger entre los instrumentos conectados.
14. DIGITAL I/O. Entradas/salidas digitales. Conector de 8 pines micro-DIN.
15. RS-232. Conector hembra DB-9 para operaciones RS-232.
16. INTERLOCK. Conector de bloqueo para altas tensiones de la fuente.
17. OPTION SLOT. Para instalar una tarjeta opcional.
18. MTR COMP OUT. Salida de medida completada. Utiliza un conector BNC.
19. EXT TRIG IN. Entrada de disparo externo. Emplea un conector BNC.

2.1.3.2.5. SourceMeter Keithley 2410.

El SourceMeter Keithley 2410 incorpora una fuente que permite realizar medidas de voltaje, corriente y resistencia. Este instrumento es utilizado principalmente para medidas en las que el uso de una fuente de voltaje o de corriente es necesario para la excitación del DUT. En nuestro proyecto se desarrollará una interfaz que permita al usuario utilizarlo de modo remoto y obtener rendimiento de las prestaciones del instrumento.

Las características principales de la fuente son:

- Fuente de tensión de $5\mu\text{V}$ a 1100V .
- Fuente de corriente de 50pA a 1.05A .

Se debe tener en cuenta que la fuente de alimentación proporcionará una potencia máxima de salida de 22W (21V a 1.05A ó 1100V a 21mA). Todos los instrumentos que son SourceMeter proporcionan un funcionamiento de cuatro cuadrantes que definen la potencia máxima que es capaz de proporcionar a su salida. Es la denominada característica I-V del instrumento. En los cuadrantes I y III, como se puede apreciar en la figura 2.18, el instrumento funciona como generador, por lo que se entrega potencia al DUT. En los cuadrantes II y IV, opera como receptor, disipando la potencia internamente. La tensión, corriente y resistencia puede ser medida en cualquiera de los cuadrantes.

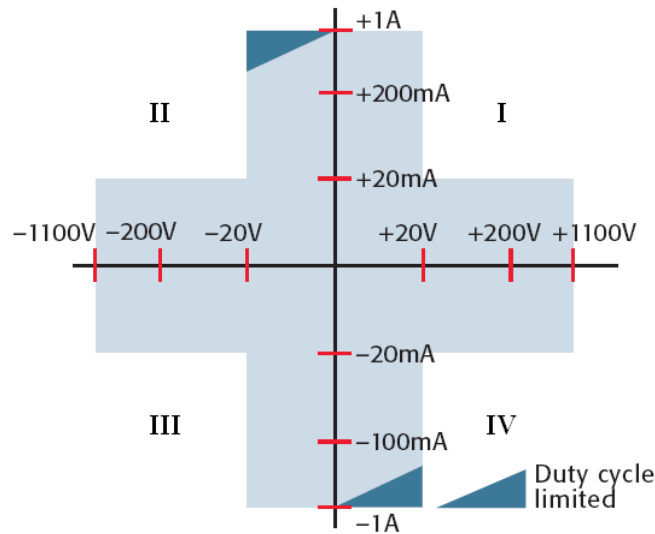


Figura 2.18. Característica I-V del instrumento Keithley 2410.

Las características de medida del instrumento Keithley 2410 son:

- Medida de voltaje de $1\mu\text{V}$ a 1100V .
- Medida de corriente de 10pA a 1.055A .
- Medida de resistencia de $100\mu\Omega$ ($<100\mu\Omega$ en medida de ohmios en modo manual) a $211\text{M}\Omega$.

Los límites máximos de fuente y de medida para las funciones de voltaje y de corriente en función del rango quedan representados en la tabla 2.12.

2410		
Range	Source	Measure
200mV	$\pm 210\text{mV}$	$\pm 211\text{mV}$
2V	$\pm 2.1\text{V}$	$\pm 2.11\text{V}$
20V	$\pm 21\text{V}$	$\pm 21.1\text{V}$
1000V	$\pm 1.1\text{kV}$	$\pm 1.1\text{kV}$
1 μA	$\pm 1.05\mu\text{A}$	$\pm 1.055\mu\text{A}$
10 μA	$\pm 10.5\mu\text{A}$	$\pm 10.55\mu\text{A}$
100 μA	$\pm 105\mu\text{A}$	$\pm 105.5\mu\text{A}$
1mA	$\pm 1.05\text{mA}$	$\pm 1.055\text{mA}$
20mA	$\pm 21\text{mA}$	$\pm 21.1\text{mA}$
100mA	$\pm 105\text{mA}$	$\pm 105.5\text{mA}$
1A	$\pm 1.05\text{A}$	$\pm 1.055\text{A}$
Max Power = 22W		

Tabla 2.12. Límites máximos para el instrumento Keithley 2410.

Los niveles mínimos de fuente y de medida son los siguientes:

- Fuente de V: $\pm 5\mu\text{V}$.
- Medida de V: $\pm 1\mu\text{V}$.
- Fuente de I: $\pm 50\text{pA}$.
- Medida de I: $\pm 10\text{pA}$.

La medida de resistencia se puede configurar para ser realizada de modo auto o de modo manual.

Cuando se configura en modo auto, el SourceMeter opera como un óhmetro o multímetro convencional con fuente de corriente constante.

Cuando se utiliza el modo de lectura manual, se puede seleccionar tanto la fuente de corriente como la fuente de tensión como excitación de nuestro dispositivo a la hora de realizar medidas de ohmios. Los rangos permitidos en el caso de medidas de resistencias son de: 20Ω , 200Ω , $2\text{k}\Omega$, $20\text{k}\Omega$, $200\text{k}\Omega$, $2\text{M}\Omega$, $20\text{M}\Omega$ y $200\text{M}\Omega$.

Cuando el instrumento funciona en modo de fuente de voltaje, se puede establecer un límite de corriente, a través del valor de compliance. La salida de la fuente no excederá de este valor.

Cuando el instrumento funciona en modo de fuente de corriente, se puede establecer un límite de voltaje, a través del valor de compliance. La salida de la fuente no excederá de este valor.

En la tabla 2.13 se puede ver el valor máximo de compliance en función del rango de medida establecido en el SourceMeter Keithley 2410.

2410	
Measure range	Maximum compliance value
200mV	$\pm 210\text{mV}$
2V	$\pm 2.1\text{V}$
20V	$\pm 21\text{V}$
1000V	$\pm 1.1\text{kV}$
1 μA	$\pm 1.05\mu\text{A}$
10 μA	$\pm 10.5\mu\text{A}$
100 μA	$\pm 105\mu\text{A}$
1mA	$\pm 1.05\text{mA}$
20mA	$\pm 21\text{mA}$
100mA	$\pm 105\text{mA}$
1A	$\pm 1.05\text{A}$

Tabla 2.13. Valor máximo de compliance en función del rango de medida en el instrumento Keithley 2410.

- *Panel frontal del SourceMeter Keithley 2410.*

La figura 2.19 muestra el panel frontal del instrumento Keithley 2410.

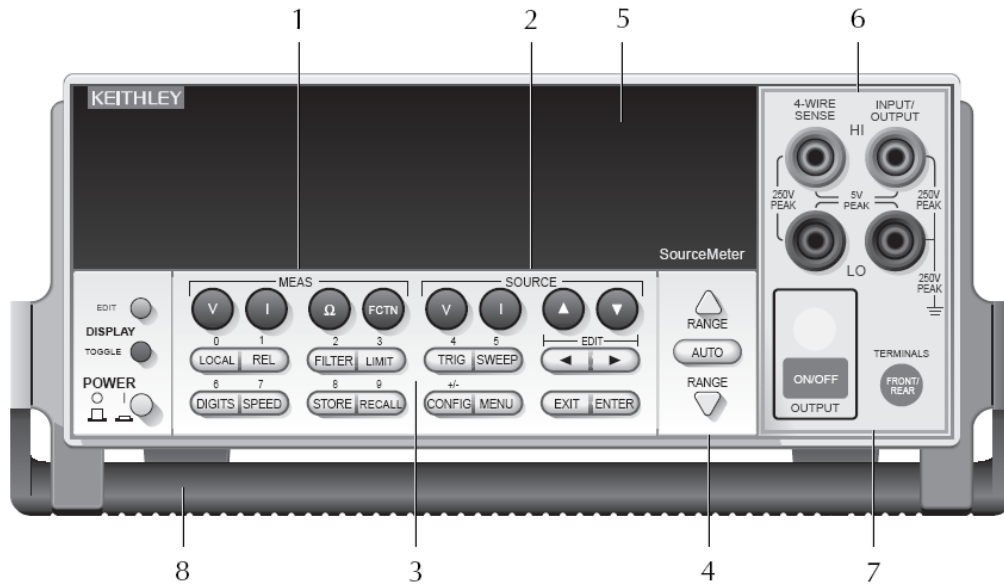


Figura 2.19. Panel frontal del SourceMeter Keithley 2410.

Además del botón de encendido/apagado (power), la pantalla y el asa (8), el SourceMeter Keithley 2410 presenta, en su parte delantera, los siguientes elementos:

1. Teclas de función de medidas (MEAS).
2. Teclas de función de fuente (SOURCE).
3. Teclas de operación.
4. Teclas de rango.
5. Indicadores de estado.
6. Conectores entrada/salida.
7. Controles de entrada/salida.

- *Panel trasero del SourceMeter Keithley 2410.*

La figura 2.20 muestra el panel trasero del instrumento Keithley 2410.

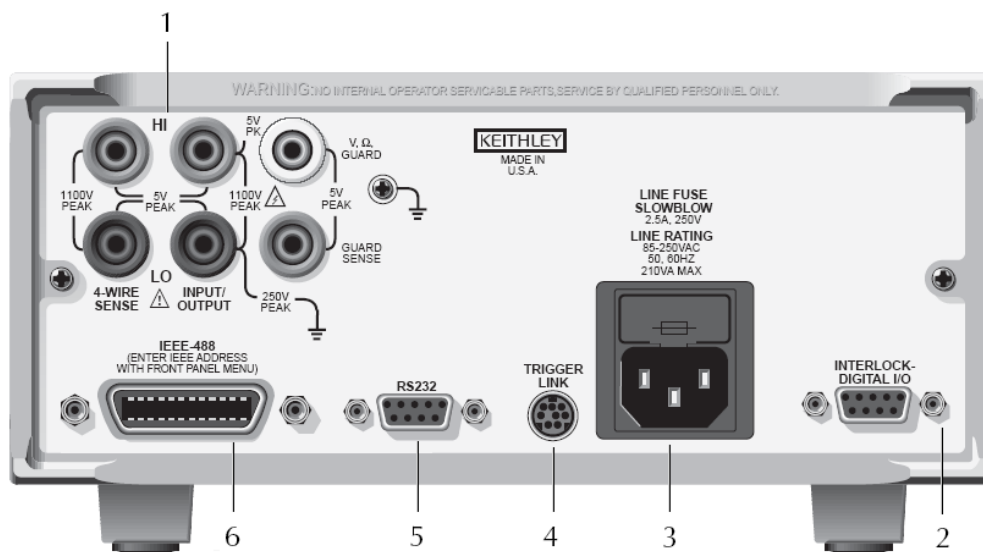


Figura 2.20. Panel trasero del SourceMeter Keithley 2410.

El panel trasero del SourceMeter Keithley 2410 presenta los siguientes elementos:

1. INPUT/OUTPUT. Los terminales o conectores de entrada/salida situados en la parte trasera del instrumento tienen la posibilidad de ser seleccionados como activos desde la tecla de control de entrada/salida situada en el panel frontal.
2. INTERLOCK AND DIGITAL I/O. Conector para entradas y salidas digitales y para interlock. Utiliza un conector DB-9.
3. POWER MODULE. Terminal de tensión de alimentación y fusibles.
4. TRIGGER LINK. Conector de ocho pines micro-DIN utilizado para enviar y recibir pulsos del trigger entre los instrumentos conectados. Utiliza un cable o adaptador trigger, como los modelos 8501-1, 8501-2, 8502 y 8504.
5. RS-232. Conector hembra DB-9 para operaciones RS-232.
6. GPIB. Bus de operaciones IEEE-488 (GPIB). Utiliza un cable apantallado, como los modelos 7007-1 y 7007-2.

2.1.3.3. Conexiones, cables y software.

La comunicación de los distintos instrumentos de medida de precisión con el PC se realiza por medio de una interfaz GPIB (General Purpose Interface Bus). Todos los instrumentos automatizados en nuestro proyecto disponen de puerto GPIB. Para dotar al PC de conectividad GPIB, usamos la tarjeta PCI-GPIB 1093-C801 de NI (National Instruments) instalada en el PC de sobremesa. Para utilizar nuestro PC portátil empleamos una tarjeta GPIB-USB-HS de NI. Este estándar de conexión será explicado con más detalle en el siguiente apartado.

Con el fin de realizar una aplicación que automatizase el control de cada uno de los instrumentos de medida de precisión disponibles, se ha empleado la plataforma de software de NI: LabView. Este entorno de programación tipo G (entorno gráfico) proporciona la flexibilidad y funcionalidad de los lenguajes de programación genéricos, así como la adquisición, control, análisis y presentación de datos. Es una herramienta muy extendida en la comunidad científica, en ingenieros y técnicos, que tratan de dar soluciones al desarrollo de aplicaciones de pruebas, medidas y control a partir de este entorno gráfico de programación.

Una utilidad de este entorno es la posibilidad de realizar programas auto-ejecutables que no necesitan tener instalada la plataforma de desarrollo en el PC de destino. El programa se encarga de cargar las librerías y comandos utilizados para que el usuario únicamente acceda a la interfaz gráfica una vez que ejecuta un archivo de tipo “.exe”.

El entorno de programación LabView y los programas desarrollados para la automatización de los instrumentos modulares que forman nuestro sistema de medidas eléctricas serán descritos en los capítulos 3 y 4 de esta memoria.

Cuando disponemos de varios instrumentos de medida a automatizar, la sincronización entre ellos se vuelve un parámetro importante. Se ha de tener en cuenta

los diferentes tiempos de integración de los instrumentos, los tiempos de respuesta y el tiempo de estabilización de la medida como requerimientos de nuestro sistema.

En sistemas con respuestas múltiples, medidas a mayor velocidad generan un gran volumen de datos, por lo que en ocasiones es necesario un gran ancho de banda para transmitirlos, y una mayor capacidad para gestionar y almacenar los valores obtenidos. Esta gestión puede realizarse con archivos de datos fácilmente utilizables por cualquier usuario, como son los archivos con extensión “.txt”. También se puede utilizar un programa más específico como Origin de OriginLab. Origin es un entorno para analizar datos y generar gráficos técnicos especialmente pensado para ingenieros y científicos. Origin incluye un entorno de programación compatible con LabVIEW, por lo que es muy útil, pensando en la gestión de los valores obtenidos, incluirlo como posible salida de datos en los programas desarrollados. De esta forma, los resultados obtenidos en un estudio o investigación quedarán cargados en Origin para su posterior procesamiento y estudio.

Por otra parte, en medidas de precisión deben utilizarse los cables y conectores destinados a tal fin, prestando atención a los tipos de conectores (BNC, banana, triax, etc.) que emplea nuestro instrumento de medida, así como a los tipos de cables necesarios para transmitir las señales correctamente. Los instrumentos de medida Keithley 182, 6487 y 6517A son los instrumentos de nuestro proyecto que utilizan una sonda de medida específica en su conexión con el DUT.

En el método de medida de voltaje constante, que será expuesto en el apartado 2.4.1.2.3, es necesario recurrir al apantallamiento electrostático del montaje experimental, para evitar los errores en la detección de la señal producidos por las interferencias electrostáticas. Éste se realiza mediante el empleo de cables microcoaxiales que protegen el conductor a través del cual se lleva la señal y usando la carcasa del dispositivo de medida para proteger de interferencias externas, para lo cual se conecta convenientemente a tierra.

Una vez determinados los cables y conectores necesarios viene el momento de determinar el tipo de conexión a emplear. Dentro del mismo instrumento, puede haber distintos tipos de conexiones en función del tipo de medida que se pretende realizar. En la figura 2.21 puede apreciarse un conector BNC típico junto con su esquema básico.

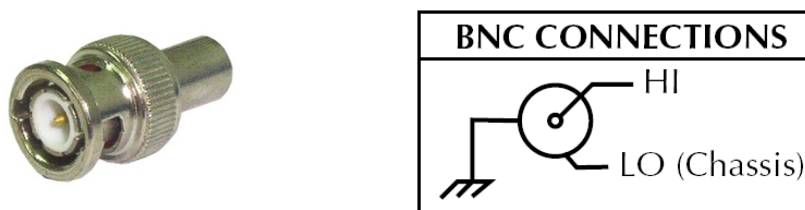


Figura 2.21. Detalle de conector tipo BNC.

Se analiza cada instrumento por separado para describir sus conexiones más comunes.

2.1.3.3.1. Nanovoltímetro Keithley 182.

La conexión para la medida de voltaje en el nanovoltímetro Keithley 182 implica unir el conector de entrada del panel frontal, mediante la sonda de medida correspondiente, con el DUT que ha de ser medido, como se puede ver en la figura 2.22.

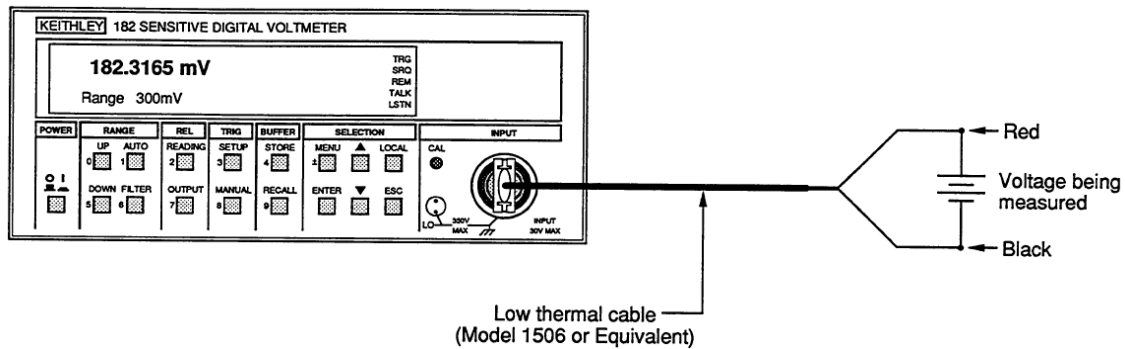


Figura 2.22. Conexión típica de prueba en el nanovoltímetro Keithley 182.

2.1.3.3.2. Multímetro Agilent 34401A.

La conexión de un multímetro Agilent 34401A depende del tipo de medida que se quiere realizar, debiendo unir el conector correspondiente de entrada del panel frontal con el DUT, mediante el cable adecuado.

La figura 2.23 (a) muestra la conexión para la medida de:

- Voltaje en corriente continua.
- Voltaje en corriente alterna.
- Resistencia a 2 hilos.
- Frecuencia.
- Continuidad.
- Comprobación de diodos.
- Período.

La figura 2.23 (b) muestra la conexión para la medida de:

- Corriente en corriente continua.
- Corriente en corriente alterna.

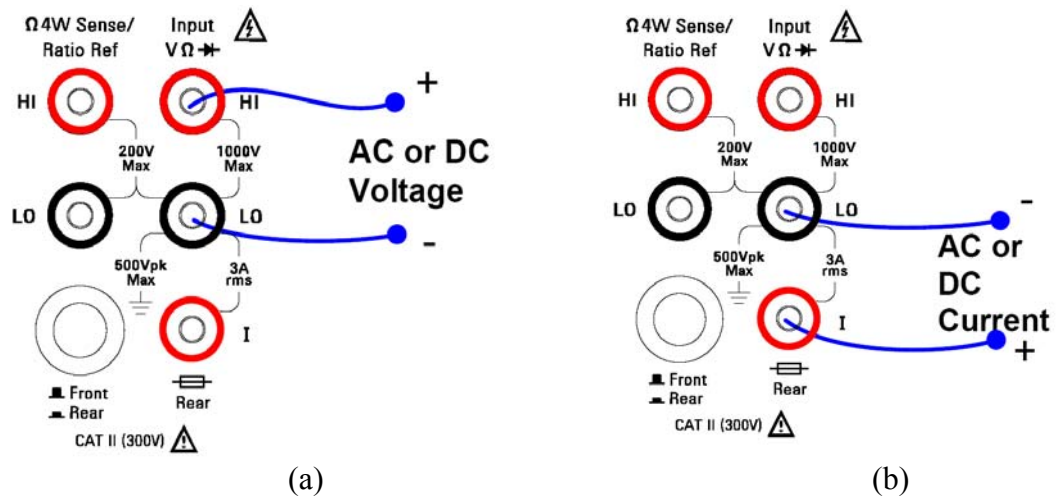


Figura 2.23. Conexiones para medidas de voltaje (a) y corriente (b) en el multímetro Agilent 34401A.

2.1.3.3.3. Picoamperímetro Keithley 6487.

El conector de entrada del instrumento Keithley 6487 es de tipo triax y está situado en el panel trasero del instrumento, como se puede ver en la figura 2.24. La sonda de medida se conecta a través de este conector.

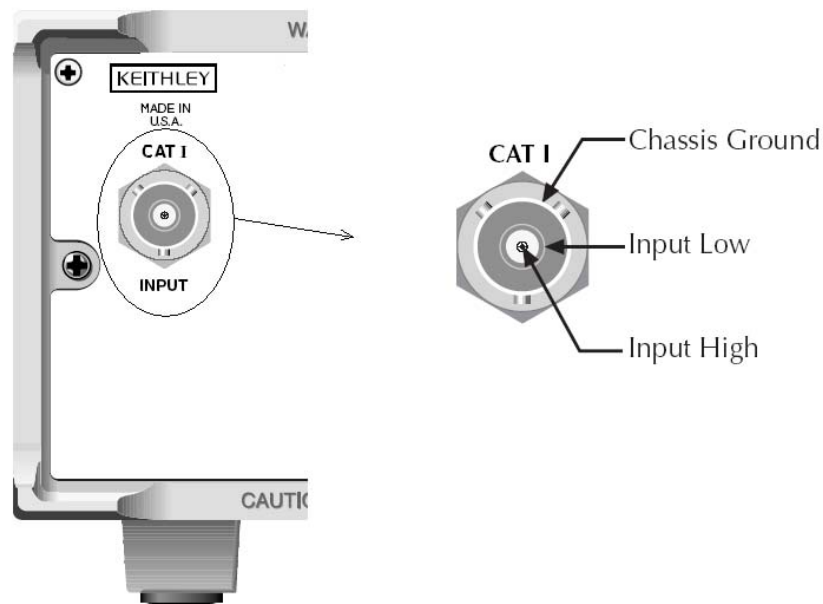
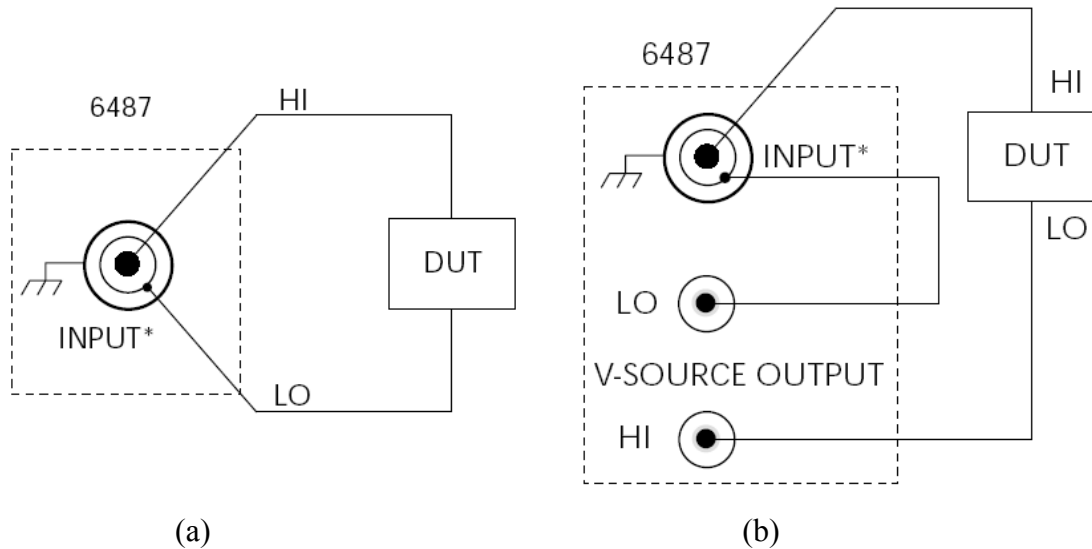


Figura 2.24. Detalle del conector de entrada para el instrumento Keithley 6487.

El circuito para medida de corriente y de ohmios puede verse en la figura 2.25. En medida de ohmios se determina la resistencia del DUT y en corriente, se determina la corriente que atraviesa al DUT.



*La máxima entrada en modo continuo corresponde a 505V de pico.

Figura 2.25. Conexiones básicas para medidas de corriente (a) y resistencia (b) en el instrumento Keithley 6487.

Este instrumento incorpora una fuente de voltaje que puede ser utilizada de modo independiente. La conexión básica para la utilización de la fuente puede observarse en la figura 2.26. Conectar fuentes externas a la fuente de voltaje del picoamperímetro Keithley 6487 puede dañar dicha fuente.

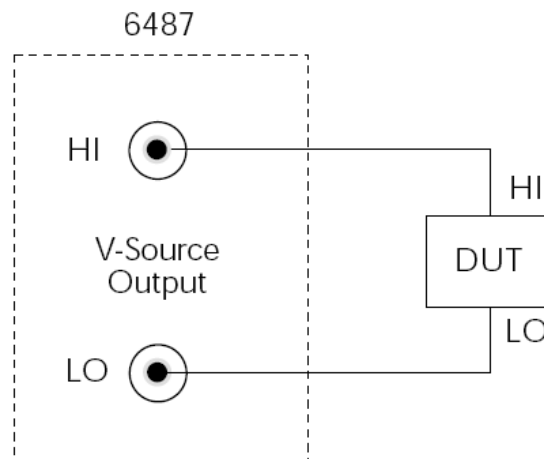


Figura 2.26. Conexión para la utilización de la fuente del instrumento Keithley 6487.

2.1.3.3.4. *Electrómetro Keithley 6517A.*

La sonda de medida se conecta a través de un conector de tipo triax, situado en el panel trasero del instrumento.

El conector de entrada puede ser configurado de dos modos:

- Sin guarda: la entrada Low, como se muestra en la figura 2.27 (a), se conecta a la cubierta interna del conector. Esta configuración es usada para medida de corriente, resistencia, carga y para medidas de voltaje sin guarda.

- Con guarda: la guarda está conectada, como se muestra en la figura 2.27 (b), a la cubierta interna del conector triax. Se accede a la entrada Low vía el borne COMMON a través de una resistencia interna de 1Ω . Esta configuración es necesaria para medidas de voltaje con guarda. Para la medida de resistencia, corriente y carga, no es necesaria.

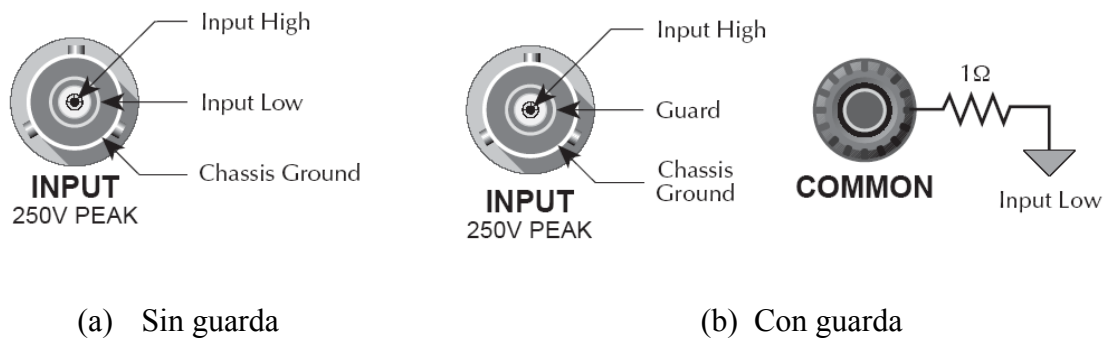


Figura 2.27. Configuración del conector de la sonda de medida sin guarda (a) y con guarda (b) en el instrumento Keithley 6517A.

La figura 2.28 muestra la configuración de conexión del electrómetro Keithley 6517A en la medida de voltaje. La caída de potencial entre los terminales de entrada High y Low no debe superar a 250V.

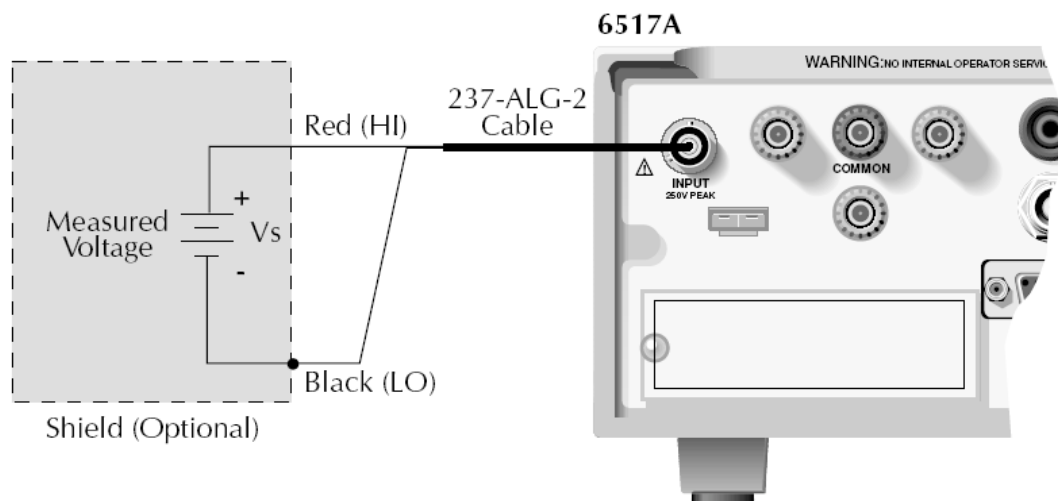


Figura 2.28. Configuración para medida de voltaje con el electrómetro Keithley 6517A.

La figura 2.29 muestra la configuración de conexión para la medida de voltaje con guarda.

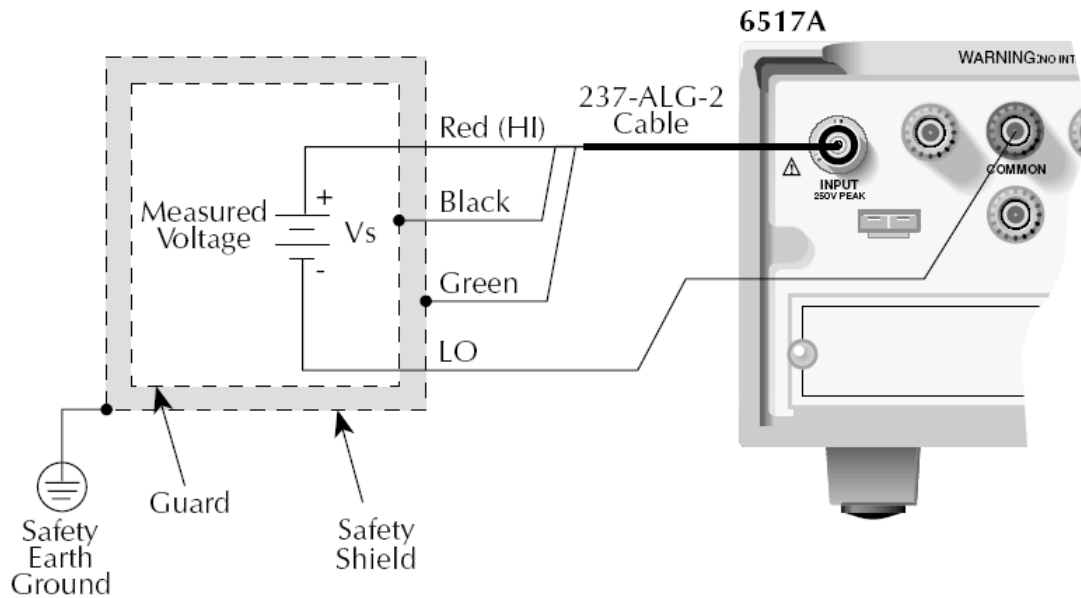


Figura 2.29. Configuración para medida de voltaje con guarda utilizando el electrómetro Keithley 6517A.

La figura 2.30 muestra la configuración de conexión del electrómetro Keithley 6517A en la medida de corriente. Para medidas de corriente, en la entrada no debe aplicarse un voltaje superior a 250V.

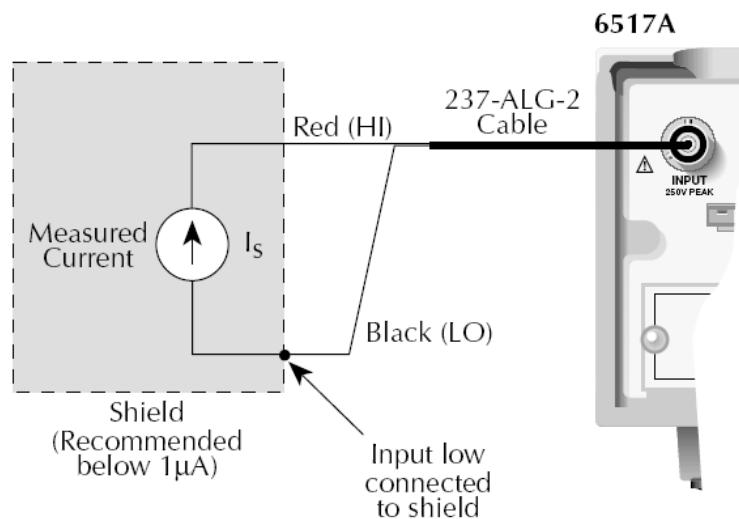


Figura 2.30. Configuración para medida de corriente utilizando el electrómetro Keithley 6517A.

La figura 2.31 muestra la configuración de conexión del electrómetro Keithley 6517A en la medida de carga.

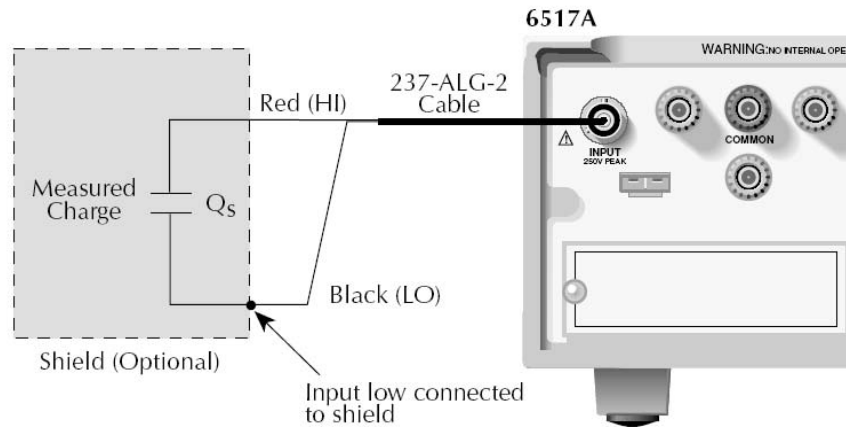


Figura 2.31. Configuración para medida de carga con el electrómetro Keithley 6517A.

La figura 2.32 muestra la configuración de conexión del electrómetro Keithley 6517A en la medida de resistencias. El terminal LO de la fuente de voltaje (V-Source) está internamente conectada con el terminal LO de entrada del electrómetro.

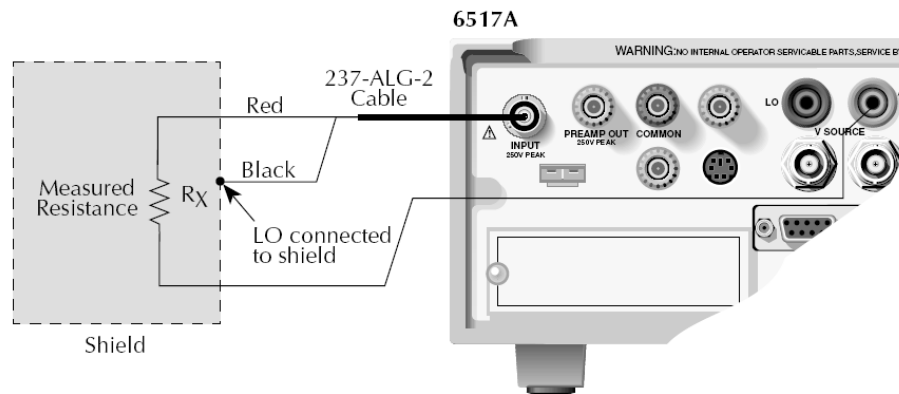


Figura 2.32. Configuración para medida de resistencia con el electrómetro Keithley 6517A.

La figura 2.33 muestra la configuración de conexión del electrómetro Keithley 6517A en la medida de temperaturas. Se debe conectar el termopar modelo 6517-TP (termopar de tipo K) al terminal correspondiente del panel trasero del instrumento.

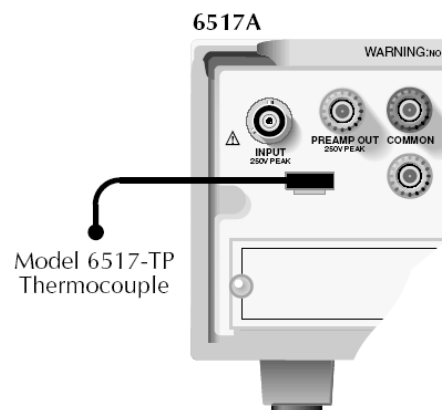


Figura 2.33. Configuración para medida de temperatura con el electrómetro Keithley 6517A.

Este instrumento incorpora una fuente de voltaje que puede ser utilizada de modo independiente. A la fuente de salida se accede desde el panel trasero del instrumento. La conexión básica para la utilización de la fuente puede observarse en la figura 2.34.

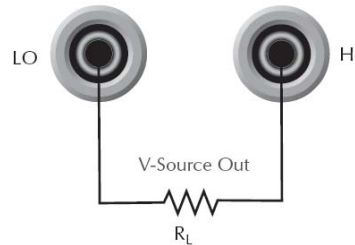


Figura 2.34. Conexión para la utilización de la fuente del instrumento Keithley 6517A.

Es recomendable mantener al instrumento en la configuración de “ZeroCheck” mientras no se esté realizando una medida. Además, también es aconsejable mantenerla cuando se vaya a cambiar la función de medida.

2.1.3.3.5. SourceMeter Keithley 2410.

Los terminales de medida/fuente son accesibles desde el panel frontal o desde el panel trasero. Pulsando su control correspondiente, situado en el panel frontal, se escoge cuales son los activos. El indicador REAR iluminado muestra que los terminales traseros están activos. Cuando el indicador está apagado, los terminales presentes en el panel frontal serán los activos. El terminal de guarda sólo es accesible desde el panel trasero.

El voltaje debe ser limitado externamente a 250V, con 1.05A máximo, para prevenir daños en el instrumento.

El instrumento Keithley 2410 permite realizar medidas en configuración de dos y cuatro puntas. La figura 2.35 muestra las conexiones del instrumento para estas configuraciones de medida. En la medida a cuatro puntas se tiene que configurar el instrumento para activar esta sensibilidad. Al activarla se muestra en la pantalla el indicador 4W.

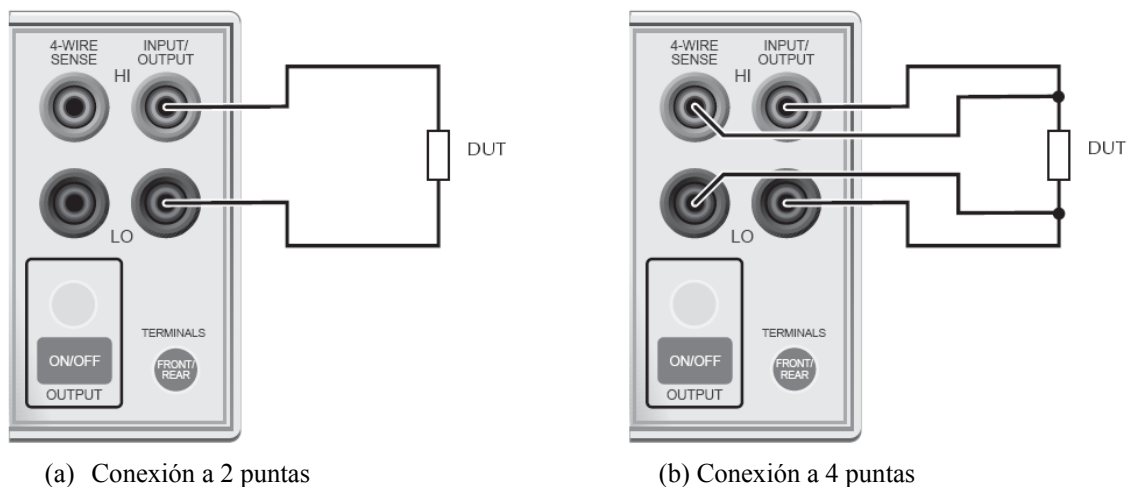


Figura 2.35. Configuración de conexión para la medida a dos (a) y cuatro (b) puntas con el SourceMeter Keithley 2410 desde el panel frontal.

Cuando la medida se realiza con guarda se deben activar los conectores para tal fin, localizados en el panel trasero del instrumento. El terminal de guarda está virtualmente al mismo potencial que el terminal INPUT/OUTPUT HI. Cualquier voltaje potencialmente peligroso introducido en este terminal HI estará presente en el contacto de guarda de nuestro DUT. La figura 2.36 muestra la configuración de conexión para medida con cable de guarda a dos puntas.

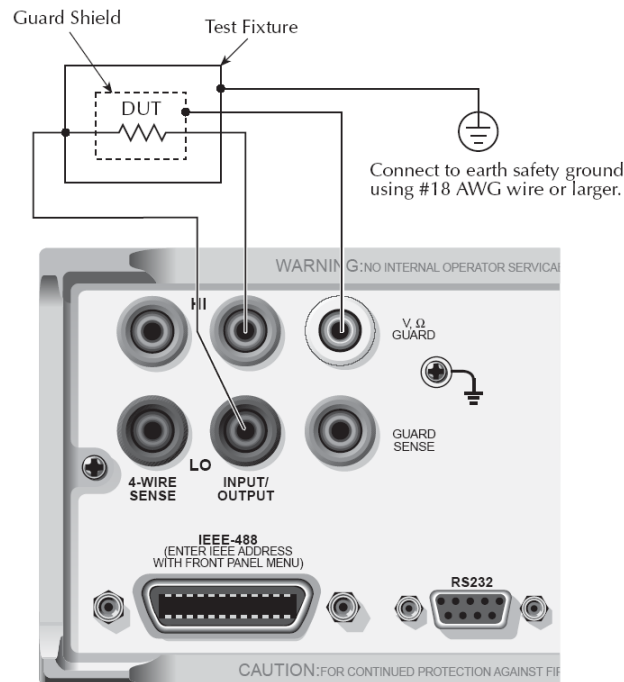


Figura 2.36. Configuración para medida con guarda a dos puntas con el instrumento Keithley 2410.

Cuando el sistema de medida está formado por más de un instrumento se hace necesario sincronizar los disparos de la medida de cada uno de los instrumentos para que haya correspondencia en la toma de medidas. En este caso es habitual que, a partir de la utilización del TRIGGER LINK, uno de los instrumentos envíe la orden de disparo al resto. En nuestro programa descrito en el apartado 4.2.1 en el que intervienen el SourceMeter Keithley 2410, el picoamperímetro Keithley 6487 y el electrómetro 6517A, se estableció que fuese el SourceMeter el que mandase la orden de disparo de medida a los otros instrumentos, dado que es el instrumento que excita el DUT. Se hace necesaria la conexión entre los instrumentos de medida para que se establezca la comunicación de sincronismo entre ellos.

El conector del TRIGGER LINK se encuentra situado en el panel trasero de los instrumentos. El pin número 2 del conector es configurado de fábrica como línea de disparo de salida, mientras que el pin número 1 del conector es configurado como línea de disparo de entrada. La configuración de los pines del conector del TLink (Trigger Link) puede ser cambiada respecto a los valores que trae prefijados de fábrica. La figura 2.37 muestra los pines del conector Tlink.



Pin Number	Description
1	Trigger Link 1
2	Trigger Link 2
3	Trigger Link 3
4	Trigger Link 4
5	Trigger Link 5
6	Trigger Link 6
7	Ground
8	Ground

Figura 2.37. Pines del conector TLINK.

La señal que ha de llegar al pin de línea de disparo de entrada y que es usada para disparar el instrumento, debe ser un pulso TTL compatible con las especificaciones mostradas en la figura 2.38 (a).

La línea de disparo de salida proporciona un pulso TTL compatible que puede ser usada para disparar otros instrumentos. Las especificaciones de esta señal pueden verse en la figura 2.38 (b).

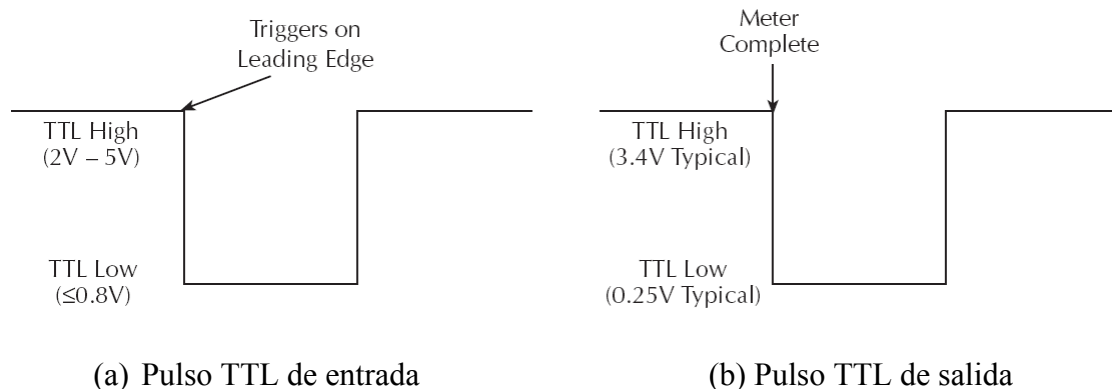


Figura 2.38. Especificaciones para el pulso TTL de entrada y de salida del TLink.

En nuestro proyecto, la fuente del instrumento Keithley 2410 excita al DUT y envía la señal de disparo al picoamperímetro Keithley 6487, que medirá corriente, y al electrómetro Keithley 6517A, que medirá voltaje. Esta configuración es útil cuando es necesario obtener mayor resolución en la medida de corriente y voltaje que la que proporciona el propio Keithley 2410. La señal de disparo (pulso TTL compatible) es enviada tras producirse un evento prefijado. En el caso del SourceMeter Keithley 2410 se escogió que fuese la realización de la medida en este instrumento.

La figura 2.39 muestra un esquema de conexión para comunicar los disparos de los tres instrumentos a través de la posibilidad que permite el Trigger Link y poder sincronizar las medidas sobre el DUT. Se necesitan los cables correspondientes de Tlink para unir los distintos instrumentos.

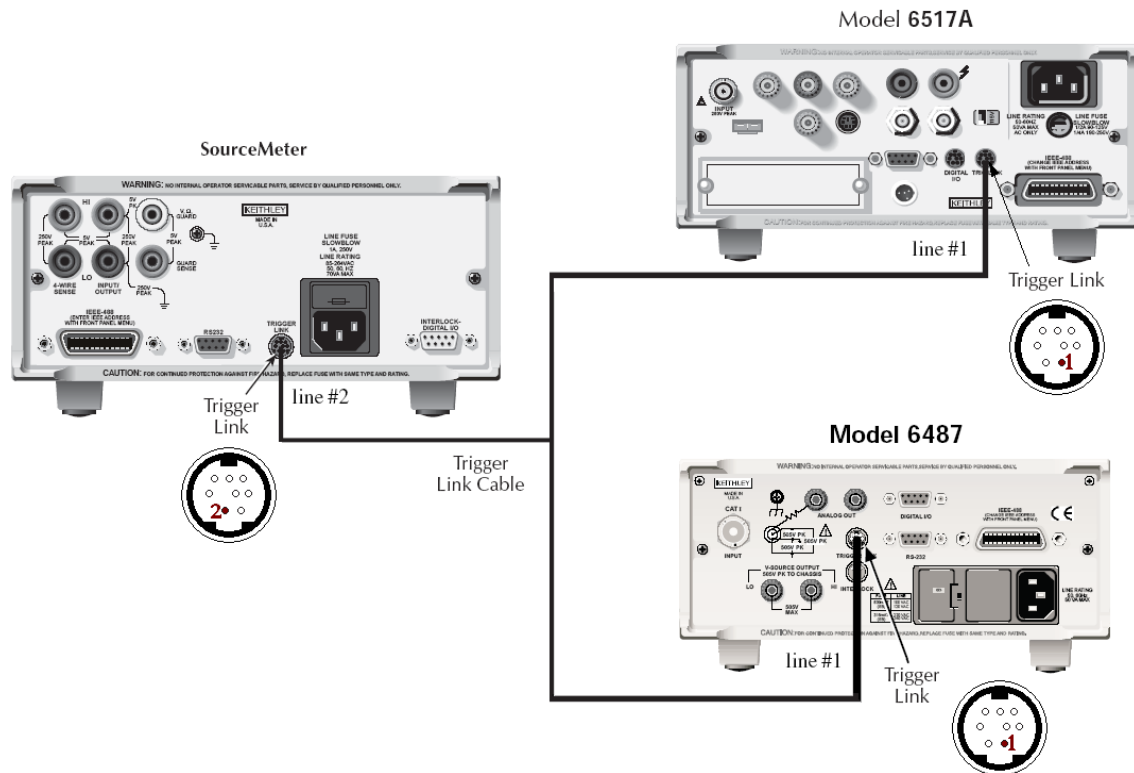


Figura 2.39. Configuración de conexión de los instrumentos Keithley 2410, 6517A y 6487 para sincronizar el disparo con Tlink.

2.1.4. Interfaz.

Cuando es necesario comunicar varios instrumentos de medida de precisión con el PC la opción más recomendable es el empleo del puerto IEEE-488 (GPIB), puesto que fue diseñado específicamente para comunicar instrumentos y controladores como el PC. Además, utiliza un simple bus paralelo, frente al puerto RS-232 que utiliza una comunicación serie de menor velocidad de transmisión. El puerto GPIB está presente en el panel trasero de nuestros instrumentos y en el PC empleado.

Las dos tecnologías de comunicación con instrumentos más comunes en la industria, GPIB y puerto serie, provienen de los años 70. Desde entonces han ido apareciendo otras tecnologías que conviven con el estándar GPIB, como son el USB, Ethernet y Firewire.

El USB fue creado como puerto para la conexión de periféricos a los PCs. Permite la conexión simultánea de hasta 127 dispositivos con una velocidad de transferencia de datos de hasta 60Mbytes/s. Sin embargo, los cables USB no están preparados para entornos industriales, presentando posibles pérdidas de datos ante el ruido electromagnético, y la distancia de conexión está limitada a 30m. Además, no existe un protocolo estándar sobre USB y cada fabricante debería desarrollar el suyo propio.

Ethernet es una tecnología de conexión de ordenadores madura y de amplia implantación. Las ventajas son su ubicuidad, la posibilidad de control remoto, y la facilidad para compartir los instrumentos entre varios usuarios. La velocidad de transmisión de datos tiene un máximo teórico entre 10, 100 ó 1000Mbits/s. Una desventaja importante inherente al diseño de Ethernet es que no es determinista. La seguridad global del sistema adquiere un mayor nivel de control y aparece la dependencia al tener que recurrir a administradores de red para montar un sistema.

Firewire fue estandarizado por el IEEE 1394 en 1995. Fue concebido para la transmisión masiva de datos en entornos alcanzando velocidades de 400Mbits/s. Firewire soporta hasta 16 dispositivos en cadena, pudiendo estar separados mutuamente un máximo de 4.5 m de distancia. Al contrario que USB, existe un protocolo definido para el control de instrumentos sobre IEEE 1394. Sin embargo, pocos instrumentos de medida lo reconocen. Un inconveniente para la implantación de este estándar es el hecho de que los cables Firewire no están inmunizados al ruido, siendo por tanto no aptos para entornos industriales.

A pesar de su enorme potencial, ninguna de las tecnologías discutidas ha conseguido una penetración apreciable en el sector del control de instrumentos de medida, donde GPIB sigue siendo el estándar dominante. Todos nuestros instrumentos presentan el bus GPIB para su comunicación.

2.1.4.1. General Purpose Interface Bus (GPIB).

GPIB es un estándar de conexión que permite la comunicación de un ordenador con instrumentos electrónicos de medida, como pueden ser generadores de funciones, osciloscopios, multímetros, etc.

Fue creado en 1965 por Hewlett-Packard, que lo denominó originalmente HP-IB (Hewlett-Packard Interface Bus), con una transferencia de datos de 1 Mb/s.

En 1975, fue estandarizado por el Institute of Electrical and Electronics Engineers como IEEE-488-1975 (actualmente 488.1), centrándose en las características eléctricas y mecánicas del bus. Posteriormente se le han dado varias denominaciones: GPIB, HP-IB, IEEE 488 Bus, IEEE 488.1.

En 1987 tuvo lugar una segunda estandarización (IEEE 488.2) que delimitó de forma más concreta la programación del GPIB, definiendo comandos de instrumentos, formato de mensajes y estado de los instrumentos. En 1990 se adoptó el formato de comandos SCPI, incluido en el 488.2, que estructura las órdenes a los instrumentos de forma lógica, permitiendo una compatibilidad más extensa. El juego de comandos SCPI son utilizados por los instrumentos empleados en este proyecto.

National Instruments introdujo una extensión compatible a IEEE-488.1, conocida originalmente como HS-488. Esta incrementa la velocidad máxima a 8 Mb/s. Fue incorporada al estándar en 2003, como IEEE-488.1-2003.

El bus de transmisión de datos de GPIB es de 8 bits en paralelo, y lógica negativa con niveles TTL estándar (verdadero si el voltaje es ≤ 0.8 V y falso si el voltaje es ≥ 2.5 V). Los conectores tienen dos lados de conexión (macho y hembra). Los hay de dos tipos: americano (24 pines) y europeo (25 pines).

La figura 2.40 muestra los cables y conectores del estándar GPIB.



a) Cable de conexión GPIB



b) Terminal de conexión GPIB

Figura 2.40. Cable (a) y terminal (b) de conexión en el estándar GPIB.

El bus de comunicación consta de los siguientes pines:

- 8 líneas de transmisión de datos (DIO1-DIO8). Los formatos de datos son indefinidos y pueden ser ASCII (American Standard Code for Information Interchange) o binarios. DIO1 es el bit menos significativo.

- 3 líneas para el control asíncrono de la comunicación (NRFD, NDAC y NRDAV). Mediante estas líneas se verifica la correcta transmisión de los datos, que es una de las fortalezas del GPIB.
- 5 líneas que gestionan la transmisión de comandos (ATN, IFC, REN, SRQ y EOI).
- El resto componen las tierras de las diferentes líneas.

La figura 2.41 muestra los pines del terminal de conexión GPIB en el conector americano (a) y el europeo (b).

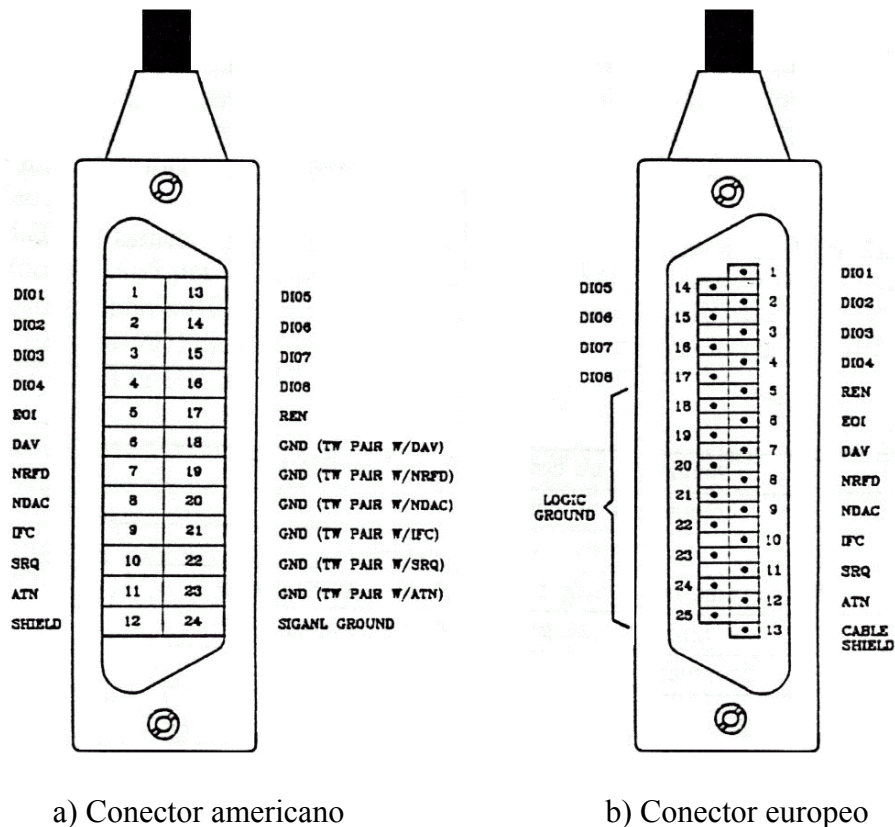


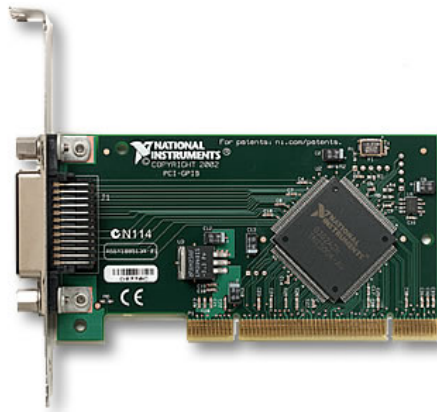
Figura 2.41. Pines del terminal de conexión GPIB con conector americano (a) y europeo (b).

Para que el bus GPIB alcance la velocidad de transmisión para la que fue diseñado (hasta 8Mbytes/s), deben cumplirse los siguientes requisitos:

- Puede haber un máximo de 15 dispositivos conectados al bus, y al menos dos tercios de ellos deben estar encendidos. Cada dispositivo tiene asignada una única dirección primaria, comprendida entre la 0 y la 30.
- La separación máxima entre dos dispositivos es 4 m, y la separación promedio en toda la red debe ser menor de 2 m.
- La longitud total de la red no debe exceder los 20 m.

Un sistema GPIB típico constará de un ordenador con una tarjeta controladora GPIB, más los instrumentos (compatibles con IEEE 488). Existen tarjetas GPIB para prácticamente todos los ordenadores presentes en el mercado (PC, Macintosh,

estaciones Sun, Silicon Graphics, etc). En el caso del PC, las tarjetas GPIB pueden conectarse al bus ISA, PCI, PCMCIA, USB, Ethernet, Firewire y los puertos serie y paralelo. Existen asimismo adaptadores para los estándares de comunicación RS-232 y RS-485. La figura 2.42 muestra tarjetas para el bus GPIB a través de interfaz PCI (a) y USB (b).



a) Tarjeta GPIB-PCI para PC



b) Tarjeta USB-GPIB para PC

Figura 2.42. Tarjetas controladoras de bus GPIB para PC a través de interfaz PCI (a) y USB (b).

En nuestro sistema los instrumentos de medida son conectados al bus GPIB y controlados, por un PC dotado de una tarjeta GPIB. Existe bastante libertad en la configuración topológica del bus, que en general, es una combinación de disposiciones lineales y en estrella, como se muestra en la figura 2.44. El PC gestiona el flujo de datos y comandos a los diferentes elementos del sistema.

La figura 2.43 muestra un sistema compuesto por un PC portátil y un instrumento de medida con conexión USB-GPIB.



Figura 2.43. PC portátil e instrumento de medida con conexión USB-GPIB.

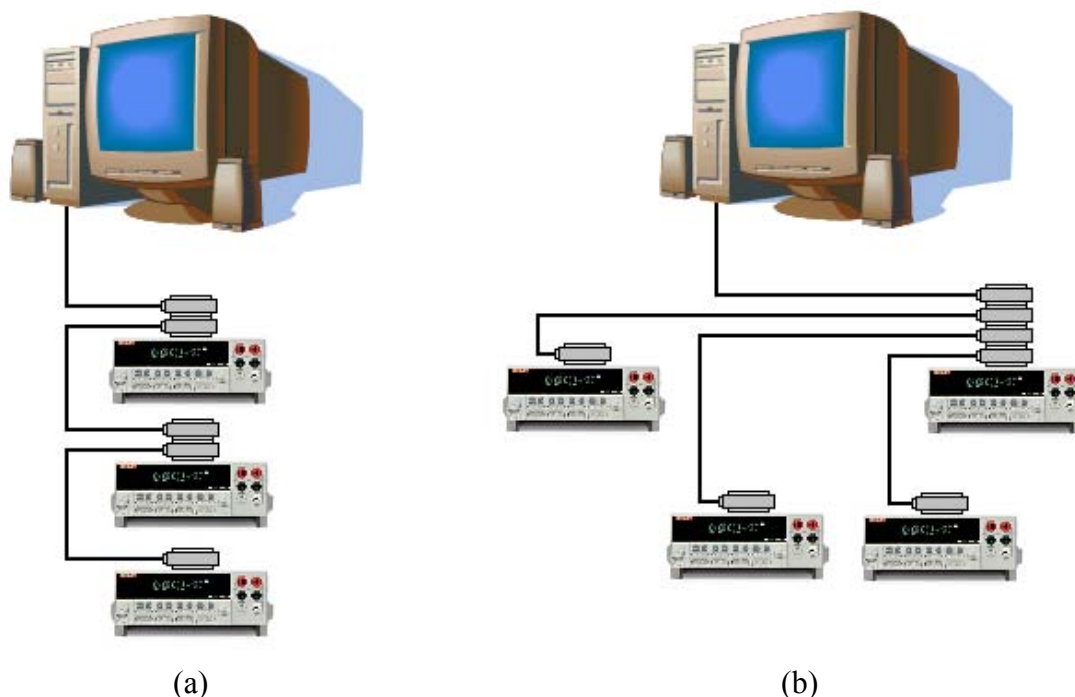


Figura 2.44. Conexión lineal (a) y en estrella (b) de un conjunto de instrumentos con bus GPIB.

La conexión lineal consiste en que cada instrumento se conecta en línea con el siguiente. La conexión en estrella consiste en tener un nodo en común en el cual todos los instrumentos están conectados. La conexión en estrella se emplea para aumentar el número de instrumentos interconectados, pero tiene como inconveniente la mayor capacidad parásita de la red, que introduce retardos y, en consecuencia, errores de transmisión.

En nuestro sistema se usaron combinaciones de disposiciones lineales y en estrella, puesto que el número de instrumentos a comunicar es bajo.

2.1.4.2. Modos *Device Dependent Command (DDC)* y *Standard Commands for Programmable Instruments (SCPI)*.

La implementación del bus GPIB mediante lenguaje DDC, que cumple el estándar IEEE 488.1, permite que el instrumento pueda ser controlado usando la programación mediante un comando dependiente del dispositivo (DDC). Cada comando consiste en una letra (ASCII) seguida de uno o más números que representan una opción o un parámetro numérico del comando. Al final debe aparecer la letra “X” que indica la ejecución del comando descrito. Por ejemplo, en el instrumento Keithley 182 se envía “R5X” para seleccionar el rango de 30mV.

En 1990 un grupo de fabricantes de instrumentos acordaron crear un conjunto de órdenes con una sintaxis común, que fue llamada SCPI (Comandos Estándar para Instrumentos Programables). SCPI se construyó respetando los principios del estándar IEEE 488.2. Si dos instrumentos (por ejemplo, dos electrómetros), de fabricantes

distintos, se adhieren al estándar SCPI, es teóricamente posible intercambiarlos con mínimas modificaciones en el programa de control. Esta ventaja del estándar SCPI es debido a la definición homogénea de comandos para todos los instrumentos de una misma clase.

Los comandos SCPI se escriben como texto ASCII, y tienen una estructura jerárquica por niveles. El signo de dos puntos (:) separa los niveles de la jerarquía. La figura 2.45 muestra un comando SCPI para un osciloscopio.



Figura 2.45. Comando SCPI para osciloscopio.

Los caracteres en mayúsculas son necesarios para especificar la orden, mientras que los que están en minúsculas pueden suprimirse, sirviendo sólo para facilitar la lectura de programas por el usuario. Los comandos pueden ser escritos indistintamente en mayúsculas o minúsculas. Así, SCALE, sca y scale representan todos al mismo comando.

Los comandos se pueden concatenar utilizando un punto y coma (;). Por ejemplo, se puede escribir la orden:

ACQuire:MODE AVE; ACQuire:MODE NUMAVg 16.

En ella se indica al osciloscopio que la adquisición va a ser en modo promedio (average) y que va a constar de 16 muestras.

Además, los niveles jerárquicos ACQuire:MODE, al ser comunes, sólo necesitan ser indicados una vez; es decir, la orden anterior equivale a:

ACQuire:MODE AVE; NUMAVg 16.

En nuestro proyecto, el nanovoltímetro Keithley 182 únicamente puede ser programado en lenguaje de comandos DDC. El picoamperímetro Keithley 6487 y el electrómetro 6517A permiten implementar el bus GPIB mediante el lenguaje DDC o bien mediante el estándar SCPI. En este caso, debe configurarse el instrumento para trabajar en un modo u otro, dado que ambos modos de comandos no son compatibles. En los instrumentos más modernos, el lenguaje SCPI es que predomina como lenguaje único de control para el bus GPIB. El multímetro Agilent 34401A y el SourceMeter Keithley 2410 utilizan la implementación SCPI para el control del bus GPIB.

2.1.4.3. Virtual Instruments Software Architecture (VISA) e Interchangeable Virtual Instruments (IVI).

La programación de un sistema con comunicación GPIB a base de comandos SCPI es bastante laboriosa. En la actualidad se utilizan controladores para los principales entornos de programación que permiten el acceso a los instrumentos a más alto nivel.

El primer paso hacia la estandarización fue VISA, un convenio de Agilent y NI para acceder a los instrumentos de la misma forma, independientemente de la interfaz física (GPIB, puerto serie, etc.).

En 1998 surgió el consorcio IVI entre una treintena de compañías, con el objetivo de alcanzar una estandarización de los controladores de los instrumentos. IVI aportó las siguientes novedades:

- Adopción de VISA, independizando la programación respecto al bus de interfaz.
- Posibilidad del intercambio de instrumentos, incluso de distintos fabricantes.
- Acceso a los instrumentos mediante un caché de estado, que optimiza el tráfico del bus.
- Posibilidad de programación multihilo.

Los controladores IVI se clasifican en función de los instrumentos de medida a los que dan servicio. Con una librería IVI, el programador puede emplear rutinas de alto nivel sin necesidad de conocer el conjunto de comandos SCPI que el instrumento utiliza.

Además, el estándar VISA ha simplificado considerablemente el desarrollo de software al hacer bastante transparente el bus físico de conexión.

En nuestro proyecto se utilizó el estándar VISA para desarrollar los programas, que automatizan los instrumentos, al más bajo nivel de programación que permitiese un mayor control sobre cada instrumento.

2.1.4.4. Programas para la comunicación GPIB.

La primera alternativa, y en ocasiones la más práctica, es el uso de software propietario desarrollado por los mismos fabricantes del instrumento. Por ejemplo, el programa gratuito Intuilink de Agilent Technologies. La ventaja de estos programas es que se pueden usar nada más conectar los instrumentos, proporcionando las funciones más comunes sin necesidad de programar. Las desventajas son que sólo pueden ser usados para la tarea para la que fueron diseñados, por tratarse de software cerrado, y que son imposibles de integrar con otros programas. A continuación se describe el software existente para el estándar GPIB:

A) LabWindows/CVI y LabVIEW de National Instruments

LabWindows/CVI (C para instrumentación Virtual) es un entorno de desarrollo completo basado en ANSI C. Los aspectos más destacables de este producto son:

- Completas librerías para la comunicación entre dispositivos (puerto serie, paralelo, GPIB, TCP/IP, etc.).
- Especial facilidad para el desarrollo de interfaces gráficas adaptadas a los instrumentos de medida.
- Soporte para los controladores IVI de numerosos instrumentos.
- Posibilidad de ofrecer un programa final ejecutable desarrollado mediante una aplicación de instalación.

National Instruments, creadores de LabWindows/CVI, ofrecen también LabVIEW, que con la misma funcionalidad, está orientado a una programación gráfica en vez del desarrollo de código C y que hace que la programación se realice de forma más intuitiva, sin necesidad de un alto nivel de programación. NI mantiene la

compatibilidad con otros compiladores de propósito general, como las distintas suites de Microsoft Visual Studio (Visual Basic, Visual C++, .NET, etc.), a través de su producto Measurement Studio. Nuestro proyecto se desarrolló íntegramente en la plataforma de programación LabVIEW.

B) Matlab con Instrument Control Toolbox

Matlab se ha convertido en un entorno de programación de propósito general con gran potencia matemática y aplicabilidad en muchos ámbitos de la ciencia y la ingeniería, gracias a sus módulos de extensión (toolboxes) de procesamiento de señales, control y ecuaciones diferenciales. Sin embargo, el entorno CVI es hoy en día mucho más maduro para el empleo de comunicación entre instrumentos electrónicos de medida.

2.1.4.5. Programación GPIB.

La estructura básica de programación utilizada se muestra en la figura 2.46.

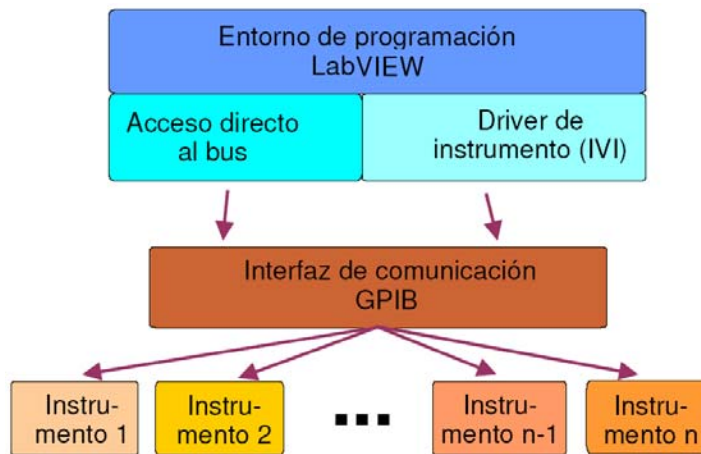


Figura 2.46. Estructura de programación de un sistema GPIB.

La programación de los sistemas GPIB se realiza por intercambio de mensajes entre los dispositivos. Estos mensajes pueden ser de dos tipos:

- De interfaz, para la gestión del bus: inicialización y direccionamiento de los instrumentos.
- De datos, dirigidos a un instrumento específico, indicando la ejecución de una función incorporada en el instrumento (tomar una medida, cambiar su configuración, etc.).

Una vez identificados los instrumentos en el bus GPIB mediante su dirección numérica (asignada en el instrumento y leída por el controlador GPIB), debemos tener en cuenta que un dispositivo conectado al bus GPIB puede estar operando en uno o varios de los siguientes modos de comportamiento:

- "Controller": Con capacidad de establecer quien envía o recibe datos y el modo de operación del bus. Sólo un equipo puede ser "controller", en nuestro caso el PC.
- "Talker": Con capacidad de enviar datos a otros equipos.
- "Listener": Con capacidad de recibir datos de otros equipos.
- "Idler": Sin ninguna capacidad respecto del bus.

2.2. Elementos y parámetros básicos de un sistema de medidas.

Todo sistema de medida se compone de varios elementos comunes. La figura 2.47 muestra el diagrama de bloques de un sistema de medidas.

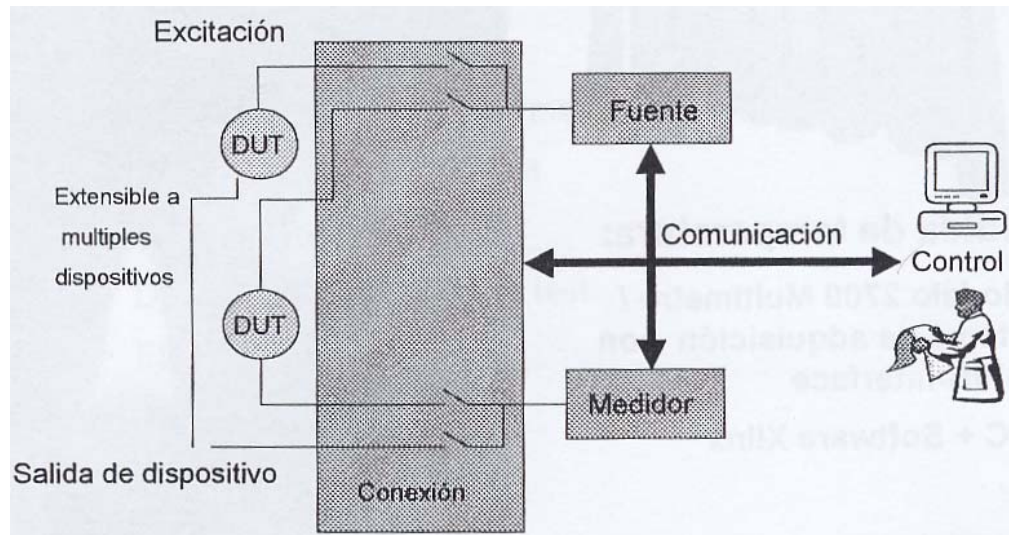


Figura 2.47. Diagrama de bloques de un sistema de medidas.

En el diagrama de bloques de un sistema de medida se distinguen los siguientes elementos:

- El dispositivo bajo test (DUT).
- La fuente, que excita con una señal al DUT.
- Un instrumento de medida, encargado de medir la señal que devuelve el DUT excitado.
- Sondas y cables, que permiten realizar las medidas.
- La conexión entre los distintos instrumentos.
- El sistema de control (PC).

2.2.1. Parámetros básicos de un instrumento.

2.2.1.1. Diagrama de bloques del instrumento.

La figura 2.48 muestra el diagrama de bloques del instrumento formado por tres etapas.

En la primera etapa, las señales analógicas presentes en el mundo real se adecúan a través de una etapa de acondicionamiento, que las adaptan a los niveles de entrada apropiados del convertidor A/D (típicamente $\pm 10V$).

En la segunda etapa, el convertidor A/D proporciona a su salida una señal digital caracterizada por un número de bits (longitud de palabra). Este número de bits

constituye el número de pasos o cuentas que admite el convertidor. El número máximo de cuentas define la resolución del convertidor A/D. Así, un convertidor de 8 bits sólo podrá dar a la salida $2^8 = 256$ valores posibles, mientras que otro de 16 bits (mayor resolución) permite $2^{16} = 65536$ valores.

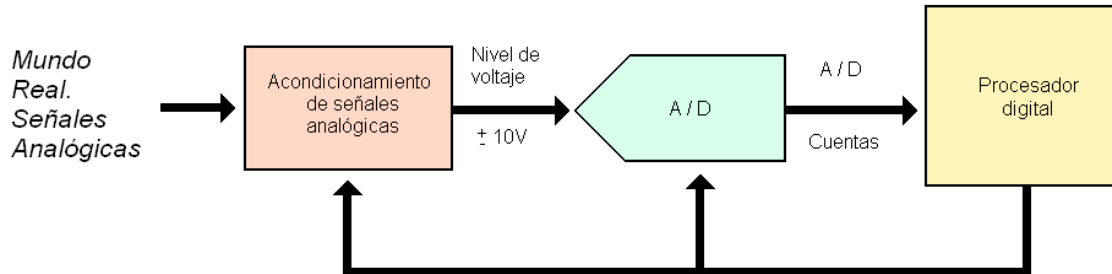


Figura 2.48. Diagrama básico de un instrumento de medida.

En la tercera etapa, el procesador digital se encarga de controlar la etapa de entrada analógica y el convertidor A/D en la toma de lecturas. Cuando el convertidor ha terminado una conversión, los circuitos digitales leen el código y aplican el factor de escala que proporciona el nivel de entrada real. La resolución del convertidor A/D fija el máximo número de dígitos de información útil que puede ser mostrado en el panel del instrumento.

Por otra parte, se define el campo de medida o rango como el conjunto de valores comprendidos entre el límite superior e inferior entre el que puede efectuarse la medida, siendo el fondo de escala la diferencia entre el límite superior e inferior de medida.

2.2.1.2. Resolución/sensibilidad.

En los instrumentos de medida, una variación continua de la señal de entrada no da lugar a una variación continua en la salida, más bien parece tener una forma escalonada. La resolución de un instrumento se define como el cambio más pequeño en el valor medido al cual responde el instrumento. Está determinada por el convertidor A/D del dispositivo de medida.

Hay varias formas de caracterizar la resolución: bits, número de dígitos, cuentas, etc. Por ejemplo, una resolución de 12 bits de un convertidor A/D indica que es capaz de representar 4096 combinaciones binarias ($2^{12} = 4096$).

Además del número de cuentas, otra forma muy típica de especificar la resolución de un multímetro digital es a partir de su número de dígitos. Así, un multímetro de 3 dígitos tiene un contador de 1000 cuentas pues con 3 dígitos se puede contar desde 000 hasta 999. Un multímetro de 4 dígitos dispone de un contador de 10000 cuentas (0000 hasta 9999).

Un multímetro de $3\frac{1}{2}$ dígitos tiene un contador de 2000 cuentas (0000 a 1999), pues $\frac{1}{2}$ significa que el dígito más significativo (el que está a la izquierda) puede valer 0 ó 1. En la fracción m/n de este convenio, m expresa el máximo alcance del dígito más significativo, y n su número de estados diferentes. Por ejemplo, en un multímetro de $3\frac{3}{4}$

dígitos (4000 cuentas, de 0000 a 3999) el dígito más significativo puede llegar a valer como máximo 3 y puede tener 4 estados distintos (0, 1, 2, y 3).

Otra manera de especificar la resolución es dándole valor al bit o al dígito de menor peso. Para ello necesitamos saber el rango de medida.

La resolución se obtiene, por tanto, de dividir el intervalo del rango de medida (valor máximo del rango – valor mínimo del rango) por el número total de cuentas. Por ejemplo, un voltímetro de 5½ dígitos sobre un intervalo de 10V tendrá una resolución:

$$\text{Resolución en un intervalo de 10V} = 10V / 200000 \text{ cuentas} = 50 \mu V.$$

Un multímetro digital de 1000 cuentas, para los rangos de 0-1V y de 0-1000V tendrá una resolución distinta:

$$\text{Resolución en rango de 1V} = 1V / 1000 \text{ cuentas} = 1 \text{ mV}.$$

$$\text{Resolución en rango de 1000V} = 1000V / 1000 \text{ cuentas} = 1 \text{ V}.$$

Cuando hablamos de convertidores A/D el valor del bit menos significativo recibe el nombre de LSB (Less Significant Bit), y se ajusta a la definición de resolución. El valor de 1 LSB depende del rango que consideremos.

$$1 \text{ LSB} = \frac{\text{Intervalo}}{n \text{ cuentas}} = \frac{\text{Intervalo}}{2^n \text{ Bits}}$$

Así, un convertidor A/D de 12 bits sobre un rango de 0V a 1V tendrá una resolución:

$$1 \text{ LSB} = 1V / 4096 \text{ cuentas} = 244 \mu V \text{ de resolución}.$$

La sensibilidad es la relación del cambio incremental en la salida para un cambio incremental en la entrada.

La sensibilidad de un instrumento (expresada en unidades del parámetro a medir) está caracterizada por su rango más bajo (intervalo de medida más bajo) dividido por el número de cuentas.

$$\text{Sensibilidad} = \frac{\text{Menor rango}}{\text{Resolución en cuentas}}$$

Por ejemplo, la sensibilidad de un convertidor A/D de 16 bits en una escala de 2V es $2V/2^{16} = 2V/65536 = 30 \mu V$.

La sensibilidad de un multímetro de 3 ½ dígitos (2000 cuentas) sobre rango de 2V es $2V/2000 = 1 \text{ mV}$.

2.2.1.3. Precisión/Exactitud/Incertidumbre.

La precisión (repetibilidad) se define como la capacidad de un instrumento de dar siempre un mismo resultado al medir la misma magnitud. La precisión se expresa como un porcentaje de la escala completa. Por ejemplo, para un voltímetro con una escala de 100V y una precisión de 0,05% toda lectura estará sujeta a una imprecisión de 0,05V ($= 0,05 \cdot 100V/100$). Si se mide 3.70V, el voltaje estará entre 3,65V y 3.75V.

Exactitud se define como la aproximación con que la lectura de un instrumento se acerca al valor real de la variable medida.

No se debe confundir los términos precisión y exactitud. La precisión no garantiza la exactitud, pero la exactitud necesita de la precisión. Mientras que la exactitud está referida al grado de aproximación entre el valor medido y el valor real, la precisión especifica el grado de concordancia de un conjunto de medidas.

La incertidumbre es el intervalo o rango de los valores posibles de una medida considerando todas las fuentes posibles de error que intervienen. Se trata del máximo error de la medida. El resultado de una medida, como el voltaje, puede expresarse acompañado de su incertidumbre, de la siguiente forma: $V \pm \Delta V$ (donde $\pm \Delta V$ representa la incertidumbre). Una medida de voltaje dada por el siguiente resultado: $2.33V \pm 0.01V$, significa que el valor exacto (verdadero) de V está comprendido entre $V - \Delta V = 2.32V$ y $V + \Delta V = 2.34V$. El valor verdadero de la magnitud queda incluido en el intervalo: $2.32V \leq V_v \leq 2.34V$.

Como regla general se toma como incertidumbre la precisión del instrumento. En ocasiones, aunque no sea demasiado correcto, se toma la mitad de la precisión como incertidumbre.

La figura 2.49 ilustra la diferencia entre resolución, precisión y exactitud.

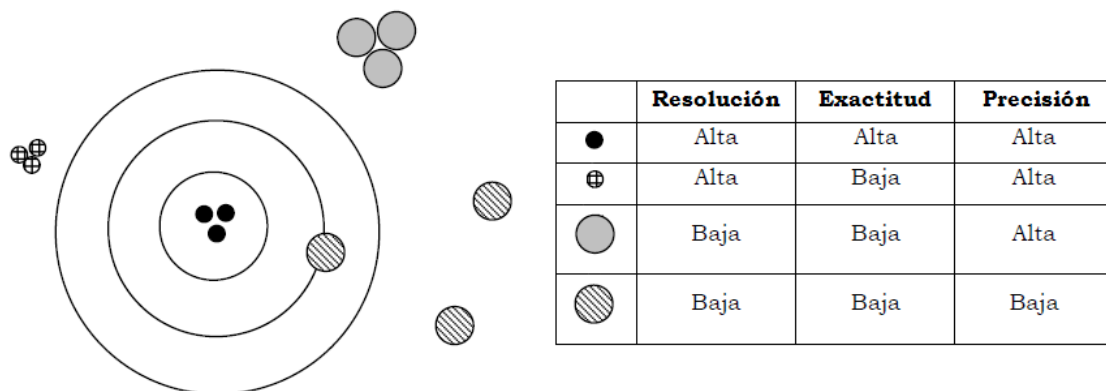


Figura 2.49. Diferencia entre resolución, precisión y exactitud.

El valor real a medir se encuentra en el centro de la diana, por lo que la exactitud aumenta cuando las medidas se aproximan a dicho punto.

El radio de los círculos es inversamente proporcional a la resolución. Los círculos más pequeños representan medidas de alta resolución.

La separación de los círculos de un mismo tipo nos da idea de la precisión de la medida.

2.2.1.4. Velocidad/bajo ruido.

Un diseño meticuloso de nuestro sistema puede proporcionar unas especificaciones próximas a las del instrumento. El montaje de un sistema que incorpora instrumentación de precisión puede ser complicado y escoger el instrumento adecuado es un factor importante, pero no el único. La precisión del instrumento limita la precisión del sistema y hay que tener cuidado para evitar la corrupción de la señal antes de que alcance el instrumento.

La velocidad de medición se expresa como el número de lecturas por segundo para unas determinadas condiciones del instrumento.

Factores como el filtrado y el tiempo de integración juegan un factor importante, ya que afectan a la velocidad de medición del instrumento. El tiempo de integración es el tiempo que tarda el convertidor en realizar una medida. Nos proporciona una cota máxima de la frecuencia de la señal a medir. El cambio de estos factores de funcionamiento puede alterar la resolución y precisión, siendo necesario buscar una solución de compromiso entre velocidad y precisión.

Las características de la medida pueden ser mejoradas reduciendo la velocidad al utilizar filtrado o ciclos de integración más lentos.

La velocidad en la lectura de una medida limita la resolución y precisión debido al ruido. El ruido es una consideración al realizar cualquier medida eléctrica. Los problemas de ruido pueden ser especialmente graves cuando se hacen mediciones de bajo nivel. Velocidad y bajo ruido son propiedades opuestas.

El ruido se incrementa con el ancho de banda. Ancho de banda describe la capacidad del instrumento para responder a las señales de tiempo variable en un rango de frecuencias. Cuanto más rápidamente midamos, más ruido tendremos presente en las medidas. El ruido limita la resolución del sistema, ya que no se puede medir correctamente por debajo del nivel de ruido y una resolución limitada implica una precisión limitada. Para mantener una determinada precisión puede ser necesario limitar el ancho de banda, reduciendo el ruido.

Para unos valores de resolución, precisión y ruido determinados, existe un límite de velocidad al realizar medidas.

Las especificaciones de los instrumentos son sólo una parte de las limitaciones del sistema. Otros elementos pueden afectar en la precisión, velocidad y ruido del sistema, como son las conexiones, cables, software, etc.; que han sido descritas en el apartado 2.1.3.

Por tanto, muchos factores afectan a la velocidad el sistema:

- Retrasos de hardware (cambio de rango, estabilización de fuente y medida, tiempo de procesado digital, etc.).
- Interfaces de comunicación (GPIB, Trigger link).
- Optimización del software.
- Velocidad del PC.

Estimar la velocidad que alcanzará un sistema de prueba que no ha sido diseñado es difícil de valorar con precisión. Para estimarlo, se debe comprobar por separado cada uno de estos factores. Una forma de aumentar la velocidad es utilizar líneas de trigger entre los instrumentos, como queda explicado en el apartado 2.1.3.3.

2.2.2. Medidas de señales en c.a.

2.2.2.1. Muestreo. Teorema de Nyquist.

El muestreo de una señal es importante cuando las medidas cambian en el tiempo. El muestreo de una señal implica pérdida de información respecto a la señal de entrada, ya que para un número infinito de valores de entrada sólo tenemos un valor

finito de valores a la salida. Es fundamental saber cuántas muestras hemos de tomar, siendo el objetivo fundamental de la adquisición el poder reconstruir la señal muestreada de una manera fiel. La frecuencia de muestreo se especifica en número de muestras por segundo.

El teorema de Nyquist nos indica que la frecuencia mínima de muestreo para poder reconstruir la señal ha de ser el doble de la máxima frecuencia de la señal. En la práctica, para que la reconstrucción sea fiable, deberemos tomar muestras a una frecuencia unas 10 veces superior a la de la señal a evaluar.

El error total de las muestras será igual al error del sistema de adquisición y conversión más los errores añadidos por el ordenador. La precisión instantánea en cada muestra es igual a la precisión del sistema de adquisición y conversión.

La precisión media de los datos muestreados puede mejorarse con estos métodos:

- Aumentar el número de muestras por ciclo.
- Filtrado previo al multiplexado.
- Filtrar la salida del convertidor digital / analógico.

El aliasing se produce cuando la frecuencia de muestreo es menor que la de la señal que se muestrea. Está referido al hecho de que podemos interpretar de una manera no exacta la señal, apareciendo un "alias" de la señal (de ahí el término). Cualquier frecuencia de muestreo excesivamente baja nos da información falsa sobre la señal. La figura 2.50 (a) muestra el efecto de un muestreo lento comparado con la frecuencia de la señal. Cada punto de la gráfica de la izquierda corresponde al valor real de la muestra en un instante de tiempo dado. Al reconstruir la señal a partir de los valores digitalizados de la gráfica de la derecha no se recupera la señal original, sino otra de menor frecuencia. La figura 2.50 (b) muestra un muestreo más rápido, realizado a mayor frecuencia. La señal digitalizada refleja una onda similar a la original.

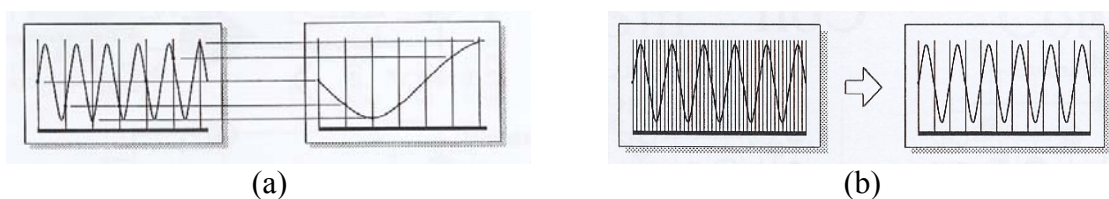


Figura 2.50. Reconstrucción de una señal de alta frecuencia muestreada a baja frecuencia (a) y a alta frecuencia (b).

Por este motivo se emplean filtros antialiasing. Estos filtros se utilizan para eliminar las componentes de alta frecuencia de una señal. Otra solución para eliminar errores provenientes del efecto aliasing es utilizar una frecuencia de muestreo superior, pero a menudo aparecen límites para la frecuencia de muestreo debido al volumen de datos generados o al ancho de banda requerido para procesar los datos.

2.2.2.2. Formas de medir una corriente alterna.

Existen dos formas de medir señales alternas:

a) Capturando la forma de onda y procesando los datos para medir la señal y analizarla.

Para realizar una adquisición de datos eficaz debemos utilizar sólo la frecuencia de muestreo necesaria. Además, debemos tener en cuenta el tiempo de estabilización de la medida.

b) Los instrumentos de medida de CC pueden medir señales de CA con un convertidor RMS (Root Mean Square) como acondicionador de señal. El convertidor RMS toma un nivel de tensión de CA y proporciona un nivel de CC proporcional al valor RMS. El convertidor A/D mide la señal de salida del convertidor RMS a cualquier frecuencia sin error de aliasing. Es el método empleado en los multímetros.

2.2.3. Parámetros críticos de funcionamiento.

Es importante definir los parámetros de funcionamiento críticos ya que sirven para tomar decisiones en el sistema de diseño. Conviene dar prioridades a estos parámetros con el fin de evitar incompatibilidades, ya que un sistema bien diseñado debe acercarse a la precisión de la instrumentación que lo forma. Al preguntarnos: ¿qué se desea comprobar en nuestro sistema?, ¿con qué rapidez o ancho de banda?, ¿con qué precisión?, ¿cuánto tiempo se dispone para completar el diseño?, ¿qué software es necesario?, ¿cuánto podemos gastar?, tratamos de buscar los parámetros más críticos de funcionamiento.

Es imposible, por ejemplo, diseñar un sistema de prueba que tenga una gran precisión, compruebe los instrumentos cada microsegundo, se tarde muy poco tiempo en desarrollarlo y cueste muy barato. Es posible conseguir cada una de estas especificaciones, pero no todas simultáneamente. Por este motivo, se debe dar mayor importancia a los factores que se consideren más críticos, fijando de forma clara las especificaciones del sistema.

2.2.3.1. Especificaciones y error en la instrumentación. Previsión de error.

Un sistema bien diseñado debe acercarse a la precisión de la instrumentación. Como parte inicial de la planificación del sistema es conveniente realizar una previsión de error. La previsión de error define todos los requisitos de precisión para el sistema de prueba.

Por ejemplo, para un sensor cuya tensión de salida tiene precisión del 0,1%, con un sistema de medida que mide de 0 a 1V con precisión de 0,01% obtenemos una relación de incertidumbre (cociente entre la incertidumbre del sensor y la del sistema) de 10:1, siendo el sistema de medida 10 veces más preciso que el sensor. La relación de incertidumbre típica oscila entre 4:1 a 10:1. Relaciones superiores indican pérdida de rendimiento.

Los errores de medida originados por el propio instrumento deberían ser facilitados por el fabricante en condiciones indicadas en las especificaciones. Lo que suele dar el fabricante de un instrumento es el valor relativo compuesto por dos términos:

$$\text{Error relativo} = \pm (\% \text{ de la lectura} + \% \text{ del rango})$$

El error relativo es un índice de la precisión de la medida. Así, tenemos:

$$\text{Precisión} = \pm (\% \text{ de la lectura} + \% \text{ del rango})$$

Sustituyendo los valores de las especificaciones del fabricante obtenemos el error absoluto para una lectura dentro de un rango.

El error proporcional al valor de la lectura viene determinado mayormente por la ganancia del amplificador, mientras que el error constante en todo el rango es principalmente motivado por el offset. El error de offset corresponde con el valor obtenido a la salida cuando la entrada es nula. De este modo tenemos:

$$\text{Precisión} = \pm (\text{error de ganancia} + \text{error de offset})$$

Por ejemplo, para un multímetro según especificaciones en rango de 2V, obtenemos:

$$\text{Precisión} = \pm (0.03\% \text{ de la lectura} + 0.01\% \text{ del rango})$$

Para una entrada de 0,5V, deducimos:

$$\begin{aligned} \text{Incertidumbre} &= \pm (0.03\% \times 0.5V + 0.01\% \times 2.0V) = \pm (0.00015V + 0.00020V) \\ &= \pm 350\mu V. \end{aligned}$$

La lectura estará en el intervalo de 0.499965V a 0.500035V.

Es común en las especificaciones abreviadas encontrar sólo el error de ganancia. El error de offset, sin embargo, puede ser el factor más significativo cuando medimos valores pequeños dentro del rango en el que estamos.

La figura 2.51 muestra la influencia de los errores de ganancia y de offset según la zona del rango que se considere. Como el error de ganancia es un tanto por ciento de la lectura, entonces, para señales de bajo nivel, correspondientes a la zona de comienzo del rango, el error de ganancia es despreciable frente al error de offset, que es constante en todo el rango. Al final del rango, para señales de alto nivel, el error de ganancia supera al de offset, y es el factor más importante. Se considera que el error de offset es el más significativo en la parte baja del rango y el de ganancia en la parte alta.

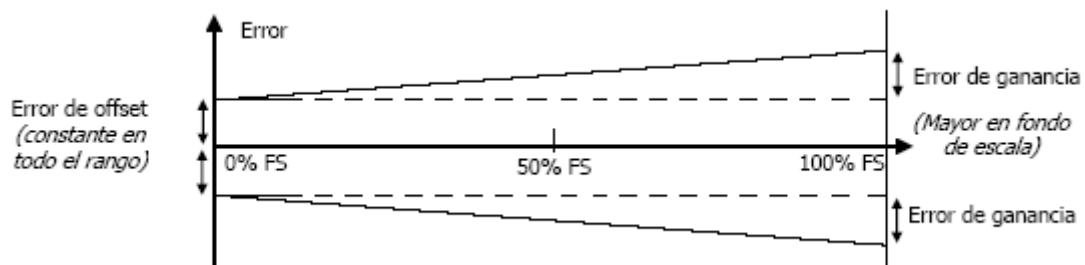


Figura 2.51. Errores de ganancia y de offset en función del nivel de la medida expresado como porcentaje del rango.

El error de ganancia aumenta linealmente con la lectura. Para especificaciones de medida con poco error de offset y un error de ganancia considerable, la pendiente es más acusada y el error de ganancia predomina. Si el error de offset es relativamente superior al de ganancia en todo el rango, la pendiente de la curva de error de ganancia se reduce y tiende a un área rectangular. En este caso, al no ser considerable el efecto del error de ganancia, la precisión suele proporcionarse como un porcentaje del rango o fondo de escala (FS). A partir de la zona media, se considera la suma de ambos errores.

La precisión puede verse afectada por factores como el ruido generado internamente, errores de linealidad (proporcionalidad de la salida de un instrumento respecto a su entrada), cambios de temperatura y tiempo desde la última calibración.

2.2.3.2. Calibración.

Las especificaciones de precisión para instrumentos de medida de alta calidad son dadas normalmente para períodos de tiempo de 24 horas, 90 días, 1 año, 2 años, o incluso 5 años desde la última calibración. La verificación o ajuste de un dispositivo se realiza dentro de un % de un valor estándar conocido.

Las especificaciones de precisión también varían con la temperatura de funcionamiento. En los instrumentos de medida, se desprecia el error introducido por la temperatura cuando ésta se mantiene dentro de un intervalo especificado.

Es necesario que se especifiquen los cambios de precisión debidos al tiempo y a la temperatura. La deriva, tanto temporal como térmica, determina las especificaciones de precisión para los fabricantes de instrumentos.

2.2.4. Fuentes comunes de error.

Son muchas las fuentes que pueden influir en las medidas, desembocando en valores erróneos. De aquí la importancia de aprender a utilizar algunas técnicas para identificar, minimizar y controlar dichos errores.

Las fuentes más comunes son:

- Captura de ruido externo.
- Resistencia de cables.
- FEM térmica.
- Carga de impedancia de entrada.
- Capacidad / tiempo de estabilización.
- Lazos de tierra.
- Guarda.
- Ruido Johnson.
- Interferencias magnéticas.
- Interferencias electromagnéticas.

2.2.4.1. Captura de ruido externo.

La forma más común de ruido externo capturado corresponde a 50 Hz de línea. Esto ocurre de forma común cerca de lámparas fluorescentes donde milivoltios de ruido son bastante típicos. Las componentes de ruido superpuestas a una señal continua pueden provocar una medida muy imprecisa y medidas fluctuantes.

El coeficiente de rechazo al ruido en modo común (CRRMC) es el parámetro relacionado con la capacidad para eliminar ruido (50Hz). Keithley, por ejemplo, utiliza en sus instrumentos una técnica denominada integración sobre ciclos de red para minimizar los efectos de 50 ó 60 Hz de línea (común en multímetros digitales). El modo de rechazo al modo común (NMRR) corresponde con la especificación dada por los fabricantes para eliminar el ruido a 50Hz a la entrada. El NMRR está normalmente definido en dB. Si por ejemplo, tenemos 1 V de ruido de 50Hz, con un NMRR de 60 dB, resultará en 1mV (1V/1000) de error en la medida. Dado que 60 dB = 1/1000.

Utilizando el instrumento en un modo medio de velocidad, que corresponde con un tiempo de integración de 1 se reduce el ruido de red. El tiempo de integración se especifica en número de ciclos de línea de alimentación (rápido = 0.1 PLC, medio = 1 PLC y lento = 10 PLC).

Cuando se realiza la integración de ciclos de red, la velocidad media más rápida es inferior a 50/seg. Cuando se utiliza una tarjeta A/D en un PC, el muestreo puede ser más rápido pero se incrementa el error. Para minimizar el ruido de red es aconsejable muestrear a una frecuencia múltiplo de esta y promediar.

El multímetro Agilent 34401A, utilizado en este proyecto, permite selecciones de ciclos de línea de alimentación de 0.02, 0.2, 1, 10 ó 100. Su selección por defecto es de 10 PLC. Únicamente los números enteros de los ciclos de línea de alimentación proporcionan rechazo al ruido de la frecuencia de línea.

2.2.4.2. Resistencia de las conexiones.

Cuando realizamos la medida de baja resistencia utilizando dos puntas hay una caída de potencial en las resistencias de las conexiones (R_{cable}), lo cual provoca que obtengamos un valor erróneo de la resistencia del DUT. La figura 2.52 muestra el circuito equivalente en medidas a dos puntas.

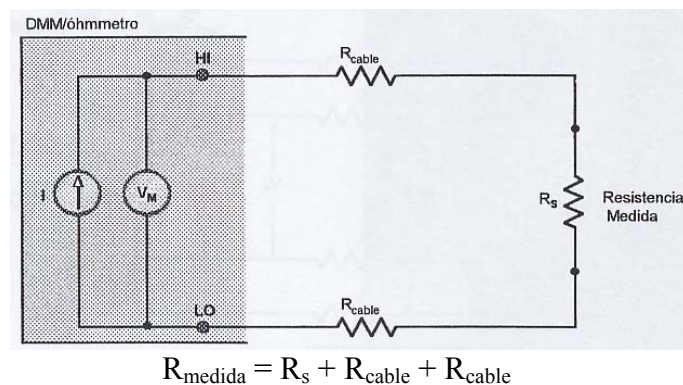


Figura 2.52. Error debido a la resistencia de las conexiones en medidas a dos puntas.

Los valores típicos para la resistencia de las conexiones (contactos) suelen ser del orden de 0,01 a 1 ohmio, lo que significa que es poco preciso medir por debajo de 10 ohmios.

Para corregir este error en medidas de bajas resistencias se utiliza el método de medida a cuatro puntas. Éste es comúnmente implementado en multímetros digitales. En este método, una corriente conocida pasa a través del DUT a evaluar a través de un par de cables, midiéndose la caída de potencial entre los extremos del mismo a través de un segundo par de cables denominados conexiones sense. Como la corriente que fluye por las conexiones sense es despreciable (del orden de pA o menor), se produce un error significativamente más pequeño que en el obtenido utilizando el método de dos puntas, pudiendo ser ignorado.

Al aplicar la ley de Ohm se obtiene el valor de la resistencia del DUT. La figura 2.53 muestra el circuito básico para el método a cuatro puntas. Este método se explicará con mayor detenimiento en el apartado 2.4.2.2.

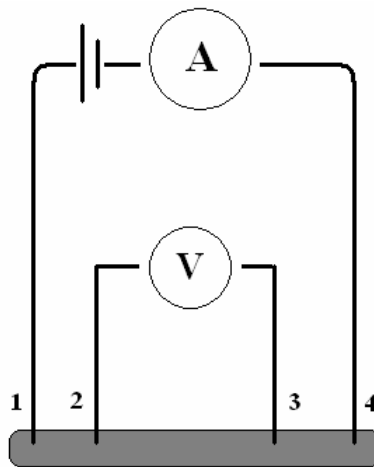


Figura 2.53. Circuito equivalente en el método de medida a cuatro puntas.

El instrumento Keithley 2410 permite realizar medidas en configuración a cuatro puntas. En el apartado 2.1.3.3.5 se explican las conexiones a realizar para configurar este tipo de medidas en este instrumento.

2.2.4.3. Fuerza electromotriz (FEM) térmica en conexiones.

Todas las conexiones hechas con metales distintos crean un efecto termopar no deseado en el circuito de medida, como puede apreciarse en la figura 2.54.

Cada termopar genera una FEM (diferencia de potencial) dependiente del gradiente de temperatura en dicha zona, lo que puede causar errores significativos en medidas sobre termopares, termistores, bandas extensométricas y muchos otros sensores, ya que el error puede ser un número alto de microvoltios.

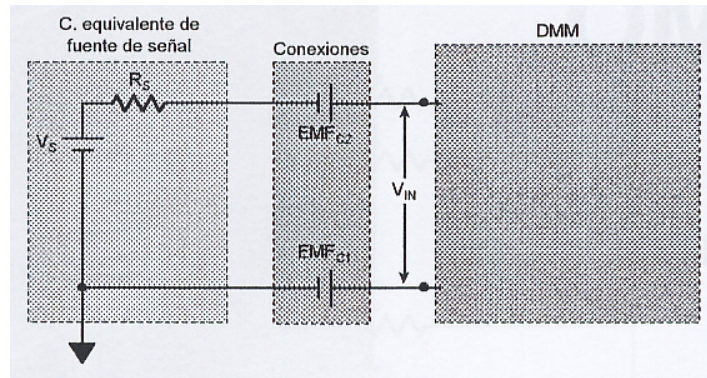


Figura 2.54. Ejemplo de FEM térmicas en conexiones.

Un método para minimizar los errores térmicos (FEM) en la medida de resistencias consiste en utilizar compensación de offset. Al emplear esta técnica, la corriente de prueba es aplicada al circuito y el voltaje resultante medido incluirá la tensión que cae en la resistencia más la FEM térmica. Durante la segunda parte del ciclo, la corriente de prueba es eliminada y el voltaje resultante de esta medición sólo es atribuible al efecto de la FEM presente en el circuito. El valor final de voltaje, debido exclusivamente al DUT_s es la diferencia entre los dos valores.

El microprocesador del multímetro digital, en nuestro caso el Agilent 34401A, permite compensar automáticamente y con rapidez el voltaje de offset.

2.2.4.4. Carga de la impedancia de entrada.

La carga depende de la impedancia de entrada de los dispositivos de medida. Por ejemplo, en el caso de los multímetros digitales, muchos tienen $10\text{ M}\Omega$ de impedancia de entrada. La impedancia de entrada de un instrumento es finita y, en consecuencia, produce un efecto de carga sobre el DUT, introduciendo un error en la medida realizada.

A mayor impedancia de entrada la medida es más precisa. Cuando la impedancia de entrada es conocida, se puede cuantificar y calcular el error que produce, por lo tanto no es considerada como una fuente de error que presenta incertidumbre. La impedancia de entrada es una fuente de error predecible y cuantificable que es necesaria tener en cuenta en la interpretación de las medidas.

Para minimizar este error es importante que la impedancia de entrada del instrumento de medida sea mucho mayor que la resistencia del DUT. Puede llegar a ser un factor crítico cuando se mide tensión en un DUT, ya que el error cometido por el instrumento que mide puede llegar a ser muy grande.

Las medidas sobre fuentes con impedancia de entrada alta a veces obligan a utilizar electrómetros con impedancia de entrada muy alta. En nuestro caso, el electrómetro Keithley 6517A presenta una impedancia de entrada de $200\text{ T}\Omega$.

Hay que tener en cuenta que la impedancia varía con el rango del instrumento. Por ejemplo, para el multímetro Agilent 34401A:

- Rangos de 100V, 1000V: Impedancia de entrada = $10\text{ M}\Omega$
- Rangos de 100mV, 1V, 10V: Impedancia de entrada = $10\text{ M}\Omega$ ó $> 10\text{ G}\Omega$

La figura 2.55 muestra un esquema de un multímetro ideal V . Éste es conectado a una fuente de tensión V_S . La lectura del multímetro es V_M , donde:

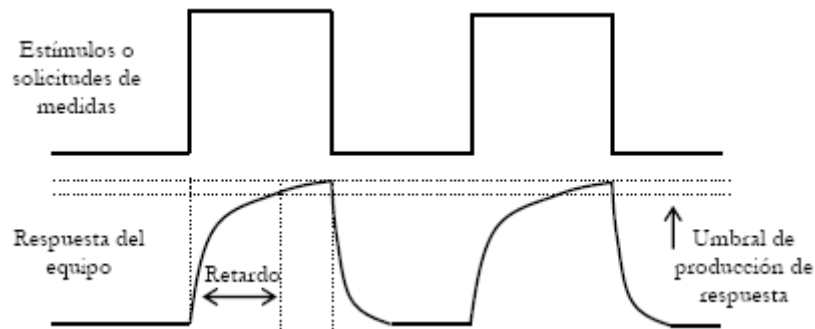


Figura 2.56. Retardo de un instrumento de medida en la producción de respuesta ante los estímulos (en cada flanco de subida).

Este error se manifiesta cuando se observan diferencias al medir de forma manual (paso a paso) respecto del modo de medida automático. En éste último, los estímulos se producen en menos de un milisegundo, por lo que conviene introducir retrasos con el fin de obtener resultados precisos.

Para minimizar este problema se debe utilizar un cable de entrada lo más corto que sea posible y/o el uso de guarda, que será explicado en detalle en el apartado 2.4.1.2.1.

En nuestro caso, el electrómetro Keithley 6517A presenta un cable triax con una capacidad nominal de 10pF. Si queremos realizar la medición de una fuente con una resistencia interna de, por ejemplo 1GΩ, se daría lugar a una constante de tiempo RC de 10 milisegundos, produciéndose el consecuente retardo en la medida.

2.2.4.6. Lazos de tierra.

Los lazos de tierra originan ruido y voltajes erróneos. Cuando la fuente de señal involucrada en la medida y el instrumento de medida están conectados a la misma toma de tierra pero en distintos puntos, se forma un circuito cerrado (lazo) que incluye el conector de tierra y el plano de tierra. El voltaje (V_G) entre la tierra del instrumento y de la fuente origina una corriente I que fluye alrededor del lazo. Esta corriente provocará un voltaje no deseado en serie con la fuente de voltaje. La figura 2.57 muestra este ejemplo.

De la ley de Ohm:

$$V_G = I \cdot R$$

Donde:

V_G = Voltaje provocado por el lazo de tierra.

R = Resistencia existente entre las tierras de los dispositivos.

I = Corriente a través del lazo.

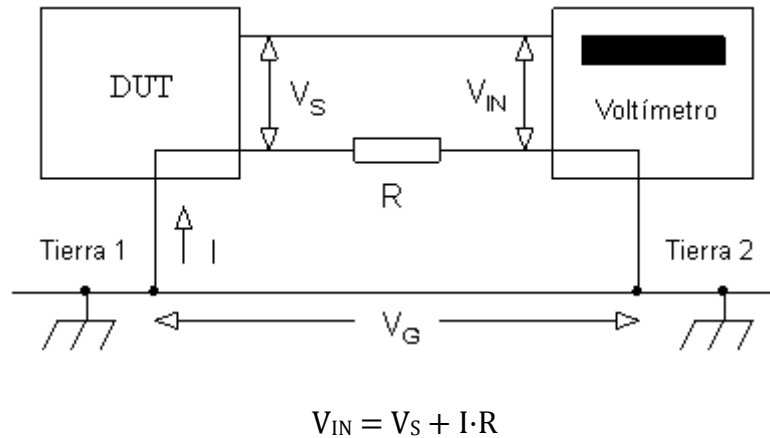


Figura 2.57. Ejemplo de la generación de lazos de tierra.

Un ejemplo típico son varios instrumentos conectados en tomas de potencia diferentes. Frecuentemente hay una pequeña diferencia en el potencial entre los puntos de tierra. Esta diferencia de potencial puede causar grandes corrientes que creen inesperadas caídas de tensión.

Para eliminar los lazos de tierra es necesario conectar todas las tierras a un mismo potencial. El modo más fácil de acoplamiento es utilizar fuentes de alimentación e instrumentos aislados y utilizar una misma tierra para todo el sistema. Debemos evitar conectar nuestros instrumentos sensibles a la misma tierra utilizada por otros instrumentos, maquinaria u otros instrumentos de alta potencia. La figura 2.58 muestra la conexión en un solo punto de tierra para eliminar el lazo de tierra.

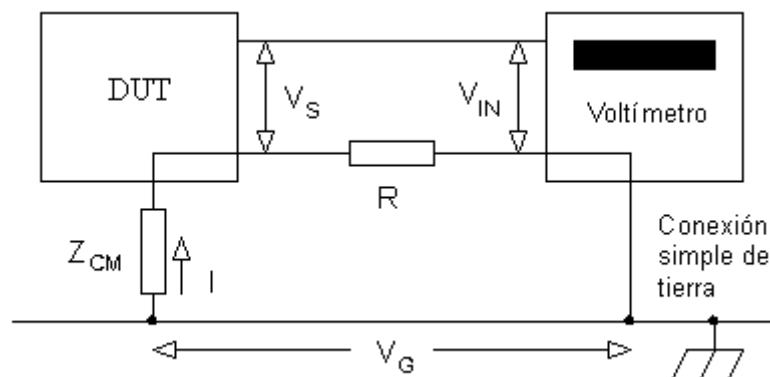


Figura 2.58. Conexión simple de tierra en un solo punto.

Con la conexión simple de tierra en un solo punto aparece una impedancia Z_{CM} de gran valor que reduce en gran medida la corriente I y por tanto, el error.

2.2.4.7. Guarda.

Cuando varios instrumentos alimentados mediante red eléctrica se conectan entre sí, se pueden crear corrientes de fuga que circulan en un bucle formado por sus respectivas fuentes de alimentación y los terminales de entrada. El lazo se completa por las conexiones a la red. Estas corrientes se manifiestan bien como ruido o bien como un offset y pueden ser eliminadas conectando la guarda del instrumento (por ejemplo el electrómetro) al terminal de tierra del instrumento generador (tensión, corriente, etc.). Una guarda es un circuito que es usado para interceptar, desviar o controlar corrientes de fuga.

En todos los casos, la guarda se conecta a un potencial definido. La conexión a la guarda se realiza normalmente a través de un terminal. Eléctricamente el potencial de guarda está situado normalmente entre masa y el terminal de entrada LO.

La técnica de guarda minimiza estos errores debidos a corrientes de fugas utilizando un amplificador interno con impedancia de salida baja. Este amplificador mantiene la pantalla al mismo potencial que la señal de alta impedancia.

El electrómetro Keithley 6517A integra funciones a modo de prueba para el cálculo de la corriente de fuga del diodo y corriente de fuga del condensador.

El tiempo de estabilización introducido en los circuitos debido a la capacidad parásita de los sistemas puede producir resultados imprecisos, como se ha comentado en el apartado 2.2.4.5. La técnica de guarda permite reducir el tiempo de estabilización cuando se realizan medidas de tensión de muy alta impedancia debido a la capacidad en paralelo que introduce.

La figura 2.59 muestra un esquema básico de un circuito que presenta capacidades parásitas y corrientes de fugas sin guarda y con guarda.

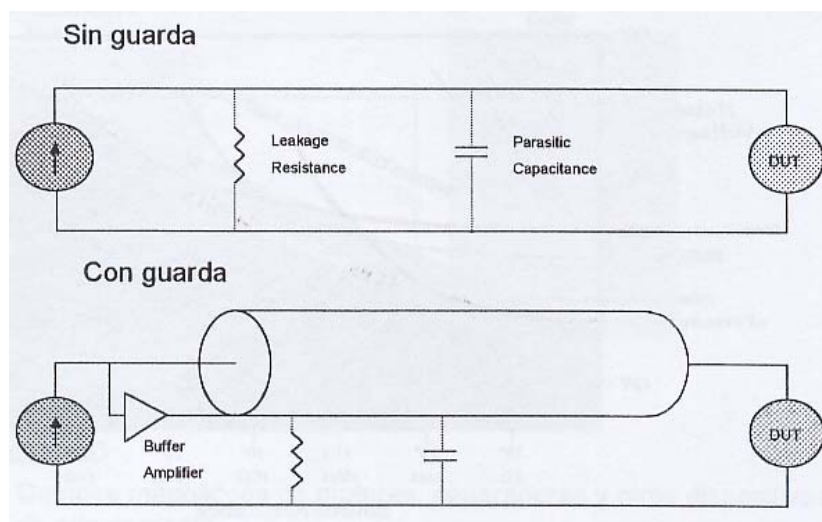


Figura 2.59. Ejemplo de circuito con y sin guarda.

La técnica de guarda permite, por tanto, reducir errores y/o tiempos de respuesta en medidas de bajo nivel. Este método se explicará con detenimiento en el apartado 2.4.1.2.1.

2.2.4.8. Ruido Johnson.

El movimiento de los electrones sobre los conductores es de tipo completamente aleatorio y recibe el nombre de movimiento Browniano. Este movimiento aleatorio produce tensiones aleatorias de ruido. Este tipo de ruido recibe el nombre de ruido Johnson o ruido blanco y aparece en todo sitio donde exista resistencia eléctrica, y tiene una distribución espectral plana, es decir, que tiene componentes en todas las frecuencias.

Por lo tanto, en cualquier resistencia la energía térmica produce el movimiento de partículas cargadas. Este movimiento que produce ruido de Johnson es el causante de limitaciones teóricas de la sensibilidad y resolución de las medidas.

La potencia del ruido viene dada por la siguiente ecuación:

$$P = 4 k T B$$

Donde:

k = Constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K).

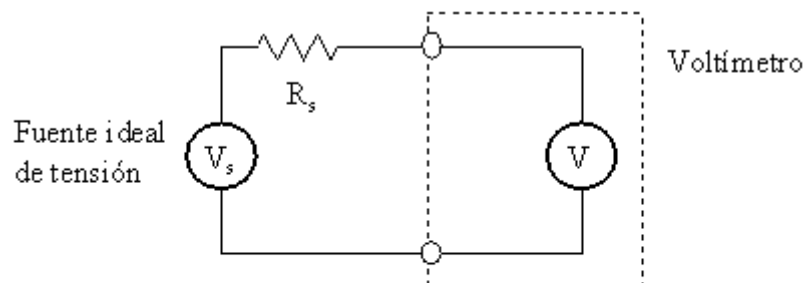
T = Temperatura absoluta en K.

B = Ancho de banda de la medida en Hz.

El ruido Johnson desarrollado en una resistencia se puede expresar como:

$$V_s = 2 \sqrt{k T B R} \quad (\text{Expresado en valor eficaz}).$$

El ruido producido en un circuito lineal comprendido entre dos terminales puede sustituirse por un circuito equivalente que esté constituido por una fuente ideal de tensión en serie con una resistencia. Al conectar un elemento entre las dos terminales fuente, la tensión que cae en él y la intensidad que lo atraviesa son las mismas tanto en el circuito real como en el equivalente. Esta equivalencia entre circuitos es conocida como teorema de Thevenin. La figura 2.60 muestra este circuito equivalente para ruido, donde la tensión de Thevenin es calculada a partir de la tensión en circuito abierto del circuito lineal y la resistencia de Thevenin es calculada como la resistencia equivalente del circuito lineal al anular todas las fuentes independientes.



- V_s : Tensión en circuito abierto
- R_s : Resistencia Equivalente Thevenin de la fuente

Figura 2.60. Circuito equivalente de una fuente de ruido ideal.

Un circuito lineal (fuente de ruido) también se puede sustituir por una fuente de corriente en serie con una resistencia, tal y como indica el teorema de Norton. El valor de la fuente de corriente resulta de dividir el valor de la fuente de tensión de Thevenin entre R_s , mientras que el valor de la resistencia de Norton es el mismo que la resistencia de Thevenin.

$$I_s = 2 \frac{\sqrt{k T B R}}{R_s} \quad (\text{Expresado en valor eficaz})$$

El ruido térmico es intrínseco a todas las resistencias y no un fallo de fabricación, aunque algunas resistencias pueden ser ruidosas en exceso.

De las ecuaciones se deduce que para reducir el ruido de Johnson es necesario reducir el valor de la resistencia en las medidas de tensión y aumentar el valor de la resistencia en las medidas de corriente. También se puede reducir el ruido si se baja la temperatura o el ancho de banda.

La figura 2.61 muestra los límites teóricos en la medida de tensión para los instrumentos: multímetro digital, nanovoltímetro y electrómetro.

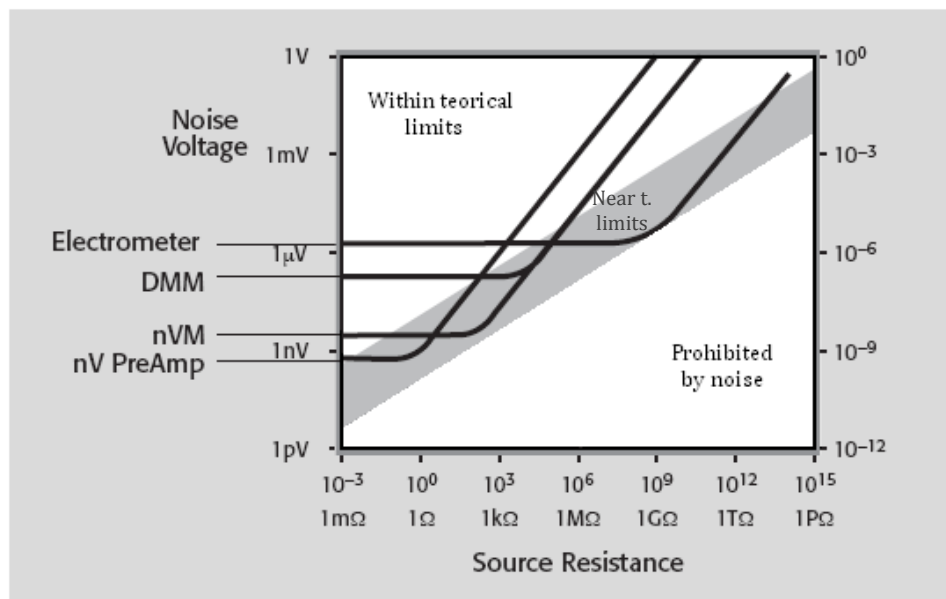


Figura 2.61. Límites típicos de medidas para varias resistencias de fuente en: Multímetro digital (DMM), Nanovoltímetro (nVM), Nanovolt-Preamplificado (nV PreAmp), y Electrómetro.

Se puede apreciar como no es posible utilizar un multímetro digital, como el Agilent 34401A, para medir las señales en los niveles cercanos a los límites teóricos de medición. Sin embargo, si la resistencia de la fuente es de $1\text{M}\Omega$ o menor, o si la resolución deseada no es mejor que $0.1\mu\text{V}$ (con baja resistencia de fuente), el nivel de señal no está cerca del límite teórico y un multímetro digital es adecuado.

Cuando se desea una mejor sensibilidad y la resistencia de la fuente es baja, un nanovoltímetro, por ejemplo el Keithley 182, proporciona un medio para medir a niveles mucho más cerca de los límites teóricos de la medición.

Con valores de muy alta resistencia (por ejemplo, $1\text{T}\Omega$) un multímetro digital no es adecuado. El multímetro presenta rangos de impedancia de entrada de $10\text{M}\Omega$ a $10\text{G}\Omega$, dando lugar a graves errores por carga de la impedancia de entrada.

Un electrómetro, como el Keithley 6517A puede hacer mediciones de tensión en los niveles que se acercan a los límites teóricos al tener una impedancia de entrada mayor.

2.2.4.9. Interferencias magnéticas.

Los instrumentos que manejan altos niveles de corriente, como motores, generadores y calentadores, originan flujos magnéticos que pueden generar, a su vez, errores debido a las tensiones que inducen.

Los campos magnéticos generan voltajes de error bajo dos circunstancias: la primera es si el campo varía con tiempo. La segunda, si hay movimiento relativo entre el circuito y el campo. La figura 2.62 muestra la presencia de fuentes de campo magnético produciendo tensiones que pueden generar error.

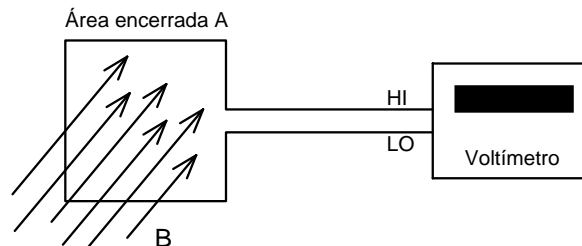


Figura 2.62. Ejemplo de baja tensión generada por campos magnéticos.

El voltaje inducido V_B se calcula según la ley de Faraday-Lenz de la siguiente manera:

$$V_B = \frac{d\phi}{dt} = \frac{d(\vec{B}A)}{dt} = \vec{B} \frac{dA}{dt} + A \frac{d\vec{B}}{dt}$$

Donde: V_B = voltaje inducido.

A = área del lazo.

B = densidad de flujo magnético.

Φ = flujo magnético.

El voltaje inducido es proporcional al área encerrada por las conexiones y a la velocidad de cambio de la densidad de flujo magnético, y puede llegar a ser de varios cientos de microvoltios. La figura 2.63 muestra la generación de una fuerza electromotriz, como consecuencia de la presencia de un campo magnético variable.

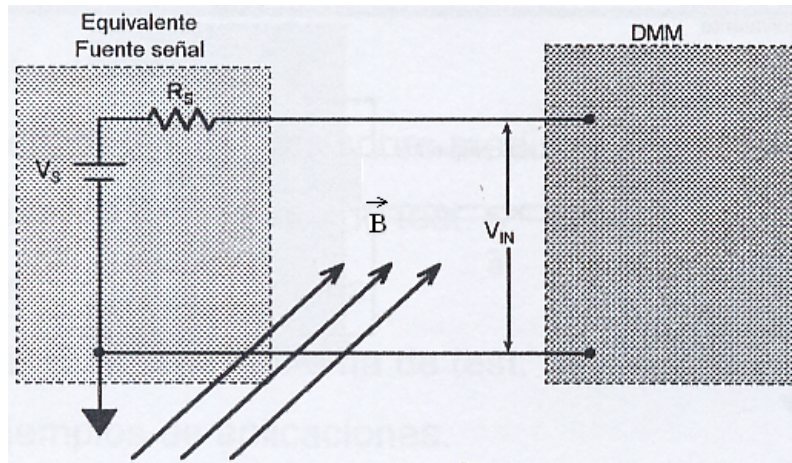


Figura 2.63. Ejemplo de interferencia magnética producido en el circuito de entrada de un multímetro digital.

Para reducir esta tensión se deben seguir las siguientes recomendaciones:

- Mantener los valores de B y A , tan pequeños como sea posible reduciendo el área encerrada (lazo) por los cables del sistema de medida y alejándolo de las fuentes del campo magnético.
- Mantener B y A constantes en el tiempo minimizando las vibraciones y movimientos que pueden producir los cambios de área y atenuando o filtrando el efecto de los campos magnéticos alternos.

Esto implica que:

- Las conexiones deben realizarse próximas y estar magnéticamente aisladas.
- Las conexiones deberían estar sujetas para evitar movimientos.
- Los cables que transporten grandes corrientes deberían también estar aislados y trenzados juntos, para prevenir generación de campos magnéticos que afecten a otros circuitos y así poder realizar medidas de bajo ruido.

La figura 2.64 muestra como el trenzado de los cables reduce la superficie, presentando un lazo pequeño.

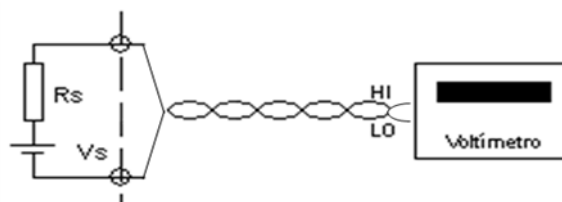


Figura 2.64. Técnica de conexión entrecruzada para la mitigación de campos magnéticos.

Al realizar los montajes para mediciones en nuestros sistemas se utilizaron las técnicas necesarias que permiten disminuir los posibles errores por interferencias magnéticas.

2.2.4.10. Interferencias electromagnéticas (EMI).

Las interferencias electromagnéticas producidas por sistemas emisores de perturbaciones electromagnéticas pueden ocasionar mediciones erráticas, offset o saturación de los circuitos de entrada del instrumento de medida. Para minimizar estos efectos se deben alejar los cables, los instrumentos de medida y los dispositivos bajo ensayo lo más posible de las fuentes de interferencia.

Normalmente el apantallamiento de los cables de medida suele reducir notablemente las interferencias. Cuando el nivel de perturbación electromagnética es mayor se debe extender esta pantalla de modo que encierre totalmente el DUT. La figura 2.65 muestra un esquema para reducir el ruido de interferencias electromagnéticas a través del apantallamiento.

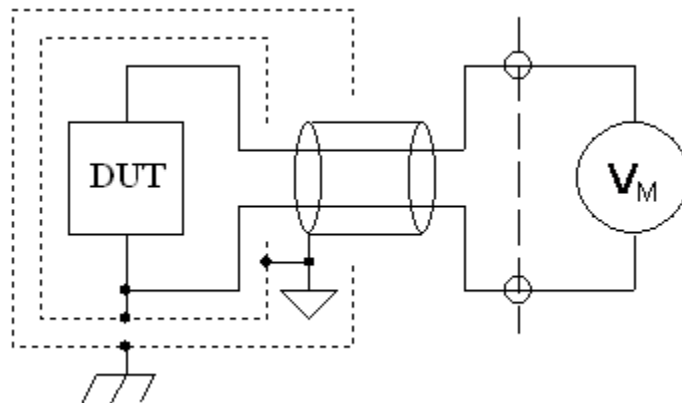


Figura 2.65. Ejemplo de doble apantallamiento para atenuar interferencias EMI.

Tanto el electrómetro Keithley 6517A, como el picoamperímetro Keithley 6487, que presentan fuentes integradas en los propios instrumentos utilizan cables de bajo ruido y, en la medida de lo posible, se deben utilizar las técnicas apropiadas de guarda y de apantallamiento.

El peso de estas fuentes comunes de error depende del método de medida aplicado (alta o baja resistencia) como será abordado en el apartado 2.4.

2.3. Sistemas de medidas basados en PCs.

Los sistemas de medidas basados en un PC proporcionan al usuario una herramienta de bajo coste y alta flexibilidad, ofreciendo una precisión moderada.

El PC puede equiparse con varias interfaces, proporcionando una elevada portabilidad y modularidad, ya que puede controlar a múltiples instrumentos. Para ello, es necesario instalar en el PC el software que permite establecer la comunicación y realizar el control sobre los distintos instrumentos presentes en nuestro sistema de medida.

Otras ventajas de estos sistemas son la posibilidad de integrar datos en tiempo real, permitiendo su análisis y visualización en el monitor, presencia de entradas/salidas digitales flexibles, trigger configurable, etc.

2.3.1. Sistemas basados en una interfaz para adquisición de datos (DAQ).

Los sistemas con una interfaz para adquisición de datos (DAQ) y basados en PC incluyen algún tipo de acondicionamiento de señal, ya que la mayoría de los sensores y transductores generan señales que se deben acondicionar para que la DAQ pueda adquirirlas. El acondicionamiento de la señal, incluye funciones como amplificación, filtrado, aislamiento eléctrico y, muestreo y retención.

Son necesarios acondicionadores de señal especiales para numerosos sensores y aplicaciones. Por ejemplo, los termopares, requieren la compensación de unión fría; RTD, termistores y transductores de presión necesitan una corriente o voltaje de excitación.

Aislamiento y filtrado son recomendados para proteger el instrumento y hacer medidas precisas en entornos industriales. La amplificación externa permite adecuar el nivel de señales pequeñas y transmitir las mejor a la tarjeta de adquisición de datos.

Toda adquisición de datos basada en un PC está condicionada por una variedad de limitaciones, sobre todo en los voltajes de entrada que deben ser visualizados. Una de estas limitaciones es el voltaje en modo común. Además, las conexiones de entradas diferenciales pueden exigir el uso de las resistencias de polarización para suministrar corrientes de polarización.

Cuando la señal real es digitalizada hay que tener en cuenta el tiempo de muestreo y retención, que fue explicado con detalle en el apartado 2.2.2. Cuando la componente de alta frecuencia de la señal es ruido, entonces es necesario eliminar estas componentes de altas frecuencias, utilizando un filtro paso-bajo para obtener sólo los datos de bajas frecuencias.

Existen en el mercado una gran variedad de tarjetas destinadas a la adquisición de datos. Estas tarjetas están presentes para la mayoría de ranuras de expansión presentes en el PC como es el Bus PCI. También se emplean el bus PCMCIA, muy presente en los PCs portátiles. La figura 2.66 muestra tarjetas de adquisición de datos.



Figura 2.66. Tarjetas de adquisición de datos con bus PCI.

Casi todas las tarjetas cumplen las siguientes características generales:

- Entradas analógicas: 12- 16 bits.
Hasta 64 canales por tarjeta.
Hasta 256 canales con multiplexor.
Hasta 500MHz.

- Salidas analógicas: Para aplicaciones estáticas con calidad de forma de onda.
- Entradas digitales: TTL o niveles superiores (optoacopladas)
- Salidas digitales: TTL o niveles superiores (relés electromecánicos)
- Presencia de contadores / temporizadores.

Cuando no es necesario el uso de una DAQ y sólo se necesita comunicar instrumentos de medida independientes con el PC, para ser configurados, controlados y volcar sus datos, la opción más recomendable es el empleo de la interfaz GPIB o serie con un programa con soporte para ello, como ya se especificó en el apartado 2.1.4.

2.3.2. Plataforma de software para la programación de instrumentos modulares.

DriverLINX proporciona al desarrollador de software una interfaz al hardware. Dispone de una interfaz estándar para funciones y servicios para el control de las tarjetas. Está formado por un conjunto de drivers para la elaboración de aplicaciones en entorno Windows, disponiendo de un conjunto de librerías de enlace dinámicas (DLL), diseñadas para soportar tarjetas de entradas/salidas (E/S) analógicas, digitales y contadoras.

Complementando las funciones básicas de E/S de las tarjetas, también proporciona la capacidad de manejar memoria, control de buffer de datos, eventos de trigger, chequeos de errores y un sistema de ayuda en línea sensible al contexto.

DriverLINX es la plataforma/estrategia universal. Simplifica la programación y el uso de las tarjetas a través de todas las plataformas de Windows, lenguajes y paquetes de software. De todos ellos, destacan:

- a) Las herramientas de desarrollo de aplicaciones bajo Windows 95/98/2000/NT/XP/Vista/7: Visual Basic (VB), C/C++ y Delphi.
- b) ExcelLINX: es un programa utilizado para poder controlar los instrumentos directamente desde la hoja de cálculo EXCEL, pudiendo aprovechar así la potencia de este programa en todas las aplicaciones.
- c) Visual Scope: permite trabajar con las tarjetas de adquisición de datos como si se tratara de un osciloscopio digital, permitiendo capturar datos en disco.
- d) LabView de NI: dispone de drivers que permiten utilizar las tarjetas e instrumentos modulares de Keithley, Agilent, etc., a través de lo que se denomina Instrumentos Virtuales (VI). Utiliza un lenguaje de programación gráfico (lenguaje G). Dispone de paquetes de software desarrollados en este entorno.
- e) TestPoint: corresponde con una herramienta de programación para diseño de prueba, medida y aplicaciones de adquisición de datos.

Nuestro proyecto se desarrolló íntegramente en la plataforma de programación LabVIEW.

2.4. Circuitos de medidas. Aplicaciones.

2.4.1. Medidas en dispositivos bajo test (DUT) de alta resistencia.

2.4.1.1. Medidas en DUT de alta resistencia y baja corriente.

Cuando nos referimos a medias de alta R estamos hablando de valores $> 10\text{ M}\Omega$. Al hablar de baja corriente indicamos que ésta debe ser $< 10\text{ }\mu\text{A}$.

Las altas resistencias de fuente son muy susceptibles de captar ruido externo, dado que están sujetas a importantes fuentes de error, como se mencionó en el apartado 2.2.4, debido principalmente a los efectos de carga de la impedancia de entrada de los instrumentos, las resistencias y capacidades parásitas, y las corrientes de fuga, presentes en conexiones y cables. Cuando sea necesario, se deben utilizar técnicas de guarda, de apantallamiento y cables de bajo ruido.

La técnica de guarda debe ser utilizada para reducir fugas y tiempo de medida. Hay que utilizar tiempos de integración de 1 ciclo de red o más y en ocasiones puede ser necesario filtrado adicional.

Debemos utilizar instrumentación de impedancia de entrada alta para no introducir efecto de carga el circuito:

- Multímetros de gama alta y SourceMeter (hasta Gigaohmios)
- Electrómetros y Picoamperímetros (alcanzan Petaohmios)

Es posible realizar medidas superiores a $1\text{ G}\Omega$ y corrientes inferiores a 1 pA con los instrumentos adecuados.

Como medimos corrientes bajas ($10\text{ }\mu\text{A}$) debemos tener especial cuidado con las conexiones hechas con metales distintos que crean un efecto termopar, por lo que es práctico seguir las siguientes recomendaciones:

- Usar cables con guarda diseñados para bajas corrientes.
- Evitar en lo posible curvaturas en los cables.
- Curvas graduales es mejor que curvaturas abruptas.
- Los cables no deben moverse ni vibrar.
- Todos los aislantes deben limpiarse de contaminantes químicos como por ejemplo fundente de soldadura graso.
- Prestar especial atención a soportes y conectores.

2.4.1.2. Métodos para medida en dispositivos bajo test (DUT) de alta resistencia.

2.4.1.2.1. Configuración con anillo de guarda.

La configuración con anillo de guarda se utiliza en medidas en DUT de alta resistencia con el fin de minimizar las fuentes de error provocadas por el efecto de carga debido a resistencias y capacidades y corrientes de fuga.

- *Efecto resistivo de carga*

Cables en mal estado y aislantes sucios pueden provocar errores de carga sobre el DUT e introducir un error en la medida realizada. La figura 2.67 muestra el circuito equivalente para medidas de tensión en el que se ha considerado un efecto resistivo de carga (R_L).

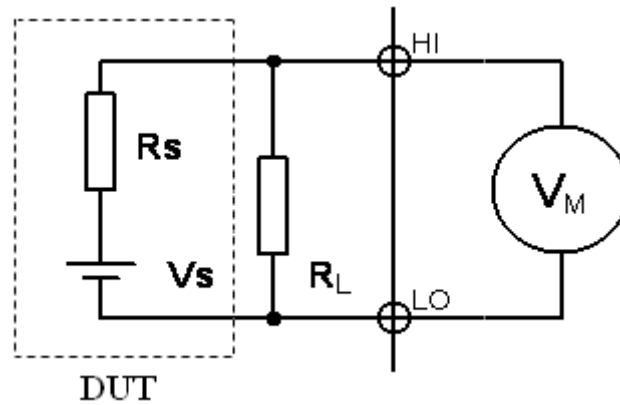


Figura 2.67. Circuito equivalente para medidas de tensión considerando el efecto resistivo de carga.

R_L tiene valores variables. A medida que aumenta su valor se produce una pérdida de tensión en esta resistencia que puede provocar que la tensión medida no sea el voltaje del DUT que se pretende medir.

Con el fin de reducir este efecto de carga resistivo se realiza la conexión de guarda como se muestra en el esquema de la figura 2.68.

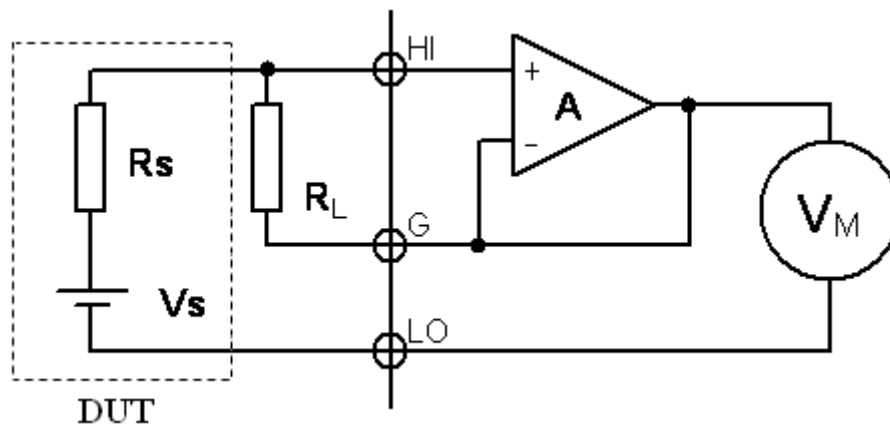


Figura 2.68. Esquema de conexión de guarda para reducir el efecto de carga resistivo en medidas de voltaje.

Se emplea un amplificador de instrumentación (A) en configuración de seguidor de emisor (buffer) de baja impedancia de salida y alta impedancia de entrada.

Analizando el circuito obtenemos la ecuación:
$$V_M = V_s \left(\frac{AR_L}{R_s + AR_L} \right)$$

Donde $A = 10^4$ a 10^6

Mediante la conexión de guarda se consigue reducir en un factor A el efecto de carga resistivo. En la figura 2.67, donde no se ha realizado la conexión de guarda, la tensión media es:

$$V_M = V_S \left(\frac{R_L}{R_S + R_L} \right)$$

El valor de la resistencia del DUT (R_S) y la resistencia que provoca el efecto de carga (R_L) forman un divisor de tensión que reduce la tensión medida.

Por ejemplo, para una $R_S = 10\text{G}\Omega$ y una $R_L = 100\text{G}\Omega$ y con una entrada $V_S = 10$, la tensión medida es $V_M = 9,09$, introduciéndose un error en la medida en este caso ($R_L > R_S$), por lo que es necesario el uso de guarda.

Si $R_L \ll R_S$, la tensión medida $V_M \approx V_S$, por lo que se obtendría una medida correcta, sin producirse ningún efecto que induzca a error, no siendo necesario el uso de guarda.

- Efecto capacitivo de carga

El efecto capacitivo de carga produce una evolución temporal exponencial de la tensión de carga del condensador equivalente C_L , introduciendo un error de medida. La figura 2.69 muestra el circuito equivalente para medidas de tensión en el que se ha considerado un efecto capacitivo de carga (C_L) sobre el DUT.

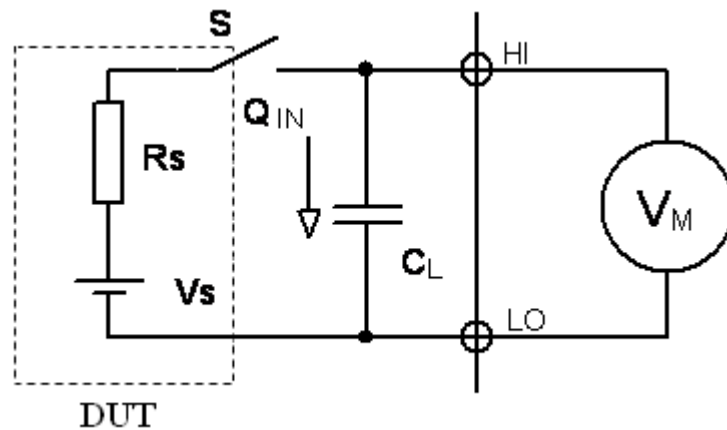


Figura 2.69. Circuito equivalente para medidas de tensión considerando el efecto capacitivo de carga.

Analizando el circuito obtenemos la ecuación: $V_M = V_S \left(1 - e^{-t/R_S C_L} \right)$

Donde:

$$Q_{IN} = V_S C_L$$

La figura 2.70 muestra la respuesta exponencial de la carga del condensador C_L . En ella se representa el porcentaje del valor final de tensión (V_S) alcanzado en el condensador frente al tiempo, expresado como un número de veces de $R_S C_L$.

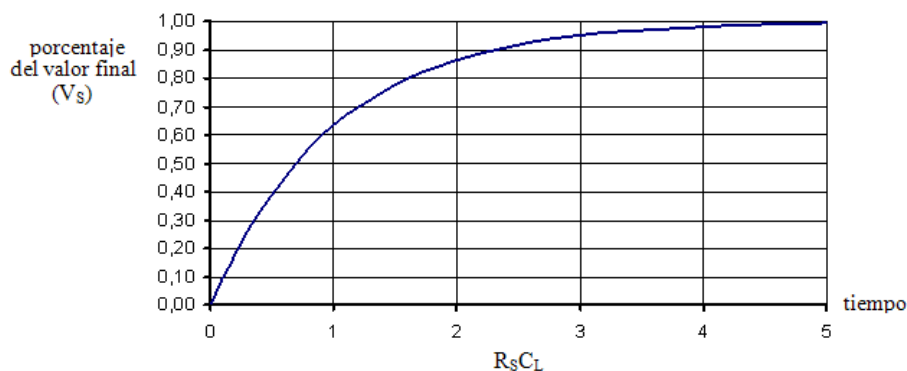


Figura 2.70. Respuesta exponencial de carga del condensador equivalente C_L .

La tabla 2.14 muestra los porcentajes de valor final para tiempos normalizados. Así, después de transcurrir una constante de tiempo $R_s C_L$ el valor medido (V_M) alcanza el 63% del valor final (V_s). Transcurridos 5 veces $R_s C_L$, el valor medido alcanza prácticamente el total del valor final (99.3%), por lo que se considera que el condensador está prácticamente cargado. Esta tabla se obtiene de interpretar la gráfica de la carga del condensador mostrada en la figura 2.69.

t normalizado a $R_s C_L$	V_M en % respecto de V_s
1	63%
2	86%
3	95%
4	98%
5	99.3%

Tabla 2.14. Porcentajes de valor final para tiempo normalizados en la carga del condensador C_L .

En el caso de que $R_s = 1\text{G}\Omega$ y $C_L = 1\text{nF}$, resulta una constante de tiempo $t = 1\text{s}$. Cuando hayan transcurridos 5 segundos el error cometido sería $< 1\%$.

El efecto capacitivo se reduce mediante el uso de conexiones de guarda como se muestra en la figura 2.71.

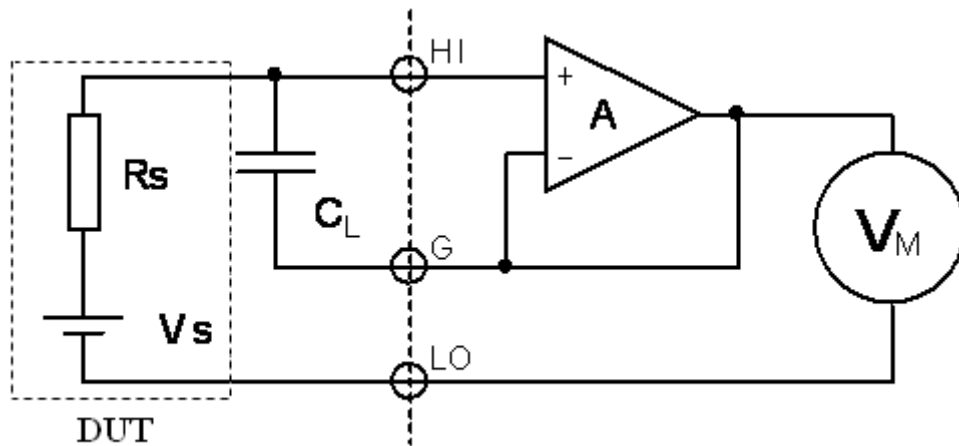


Figura 2.71. Esquema de conexión de guarda para reducir el efecto de carga capacitivo.

Analizando el circuito obtenemos las ecuaciones:

$$Q_{IN} = \frac{V_S C_L}{A}$$

$$V_M = V_S (1 - e^{-At/R_S C_L})$$

Donde $A = 10^4$ a 10^6

Mediante la conexión de guarda se consigue reducir en un factor A el tiempo de carga y, por tanto, el error cometido para un tiempo de espera dado. También se reduce la carga a la entrada en un factor de valor A.

2.4.1.2.2. Medidas de resistencia/resistividad de volumen y superficie.

Las medidas de resistencia de volumen y superficie se realizan en materiales poco conductores y materiales aislantes. La resistividad se determina a partir de la medida de resistencia multiplicada por un factor geométrico del DUT.

La forma ideal para medir la resistencia de un material aislante consiste en aplicar un potencial conocido en el DUT y medir la corriente resultante. Los rangos típicos de medida de la resistencia de aislamiento van desde $10^7 \Omega$ hasta los $10^{16} \Omega$. Para realizar este tipo de medidas debe usarse un electrómetro o un picoamperímetro.

Cuando la resistencia del volumen del material es comparable a la resistencia de la superficie del material ($R_v \approx R_s$) se deben usar los métodos de medidas de resistencia de volumen y superficie.

- Resistividad de volumen

Se define como la resistencia a través de un cubo de un centímetro de material aislante y sus unidades son: ohm·cm.

Cuando se mide la resistividad de volumen, el DUT se coloca entre dos electrodos y una diferencia de potencial se aplica entre ellos. La corriente resultante se distribuye a través del volumen del DUT.

La medida de resistividad de volumen y resistividad de superficie presentan distinto esquema de montaje. La figura 2.72 muestra el esquema para medida de resistividad de volumen en materiales aislantes.

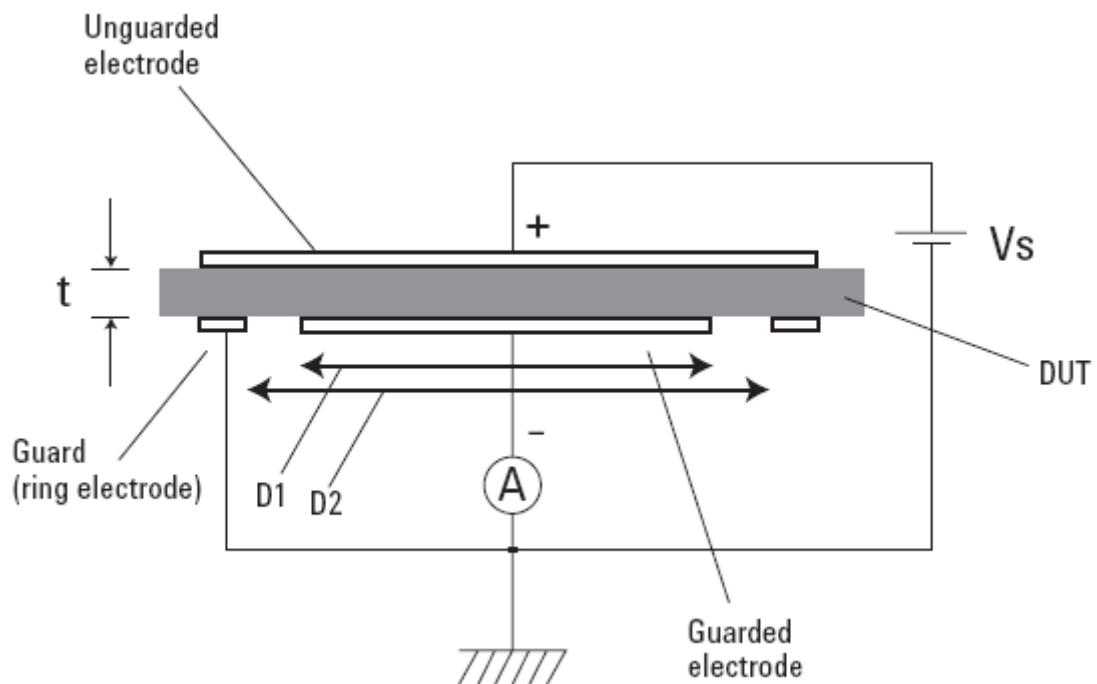


Figura 2.72. Esquema de medida de resistividad de volumen.

La resistividad de volumen es calculada a partir de la resistencia de volumen, el área efectiva del electrodo principal, y el espesor del material aislante.

$$\rho_v = \frac{\pi \left(D_1 + \frac{B(D_2 - D_1)}{2} \right)^2}{4t} \times R_v$$

Donde:

D1:	Diámetro del electrodo principal (mm).
D2:	Diámetro del electrodo de anillo (mm).
t:	Espesor del material aislante (mm).
Rv:	Resistencia de volumen.
B:	Coefficiente de área efectiva.

La figura 2.73 muestra las consideraciones geométricas del electrodo.

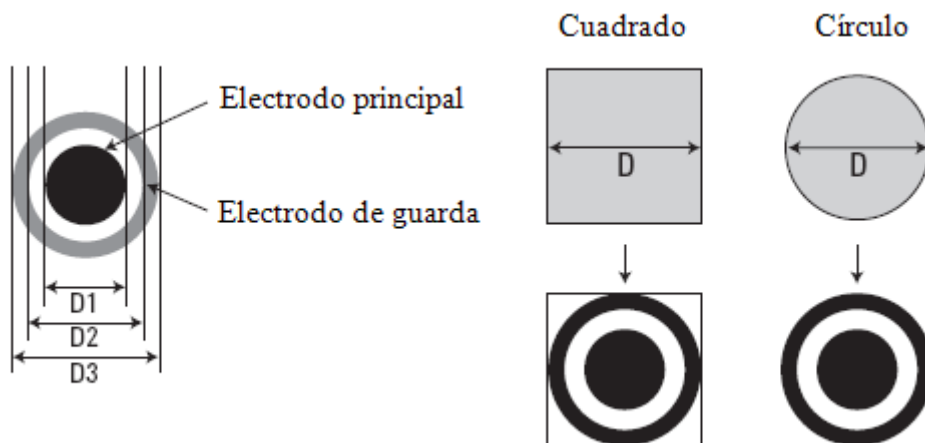


Figura 2.73. Dimensiones del electrodo y formas típicas del material.

- Resistividad de superficie.

La resistividad superficial se define como la resistencia eléctrica de la superficie de un material y se expresa en ohmios (normalmente se conoce como ohmios por metro cuadrado). Se mide mediante la colocación de dos electrodos en la superficie del DUT y aplicando de una diferencia de potencial entre ellos para obtener la corriente resultante.

La figura 2.74 muestra la configuración para la medida de la resistividad de superficie. Es similar al circuito para realizar mediciones de resistividad de volumen, salvo que la resistencia es medida entre los dos electrodos inferiores.

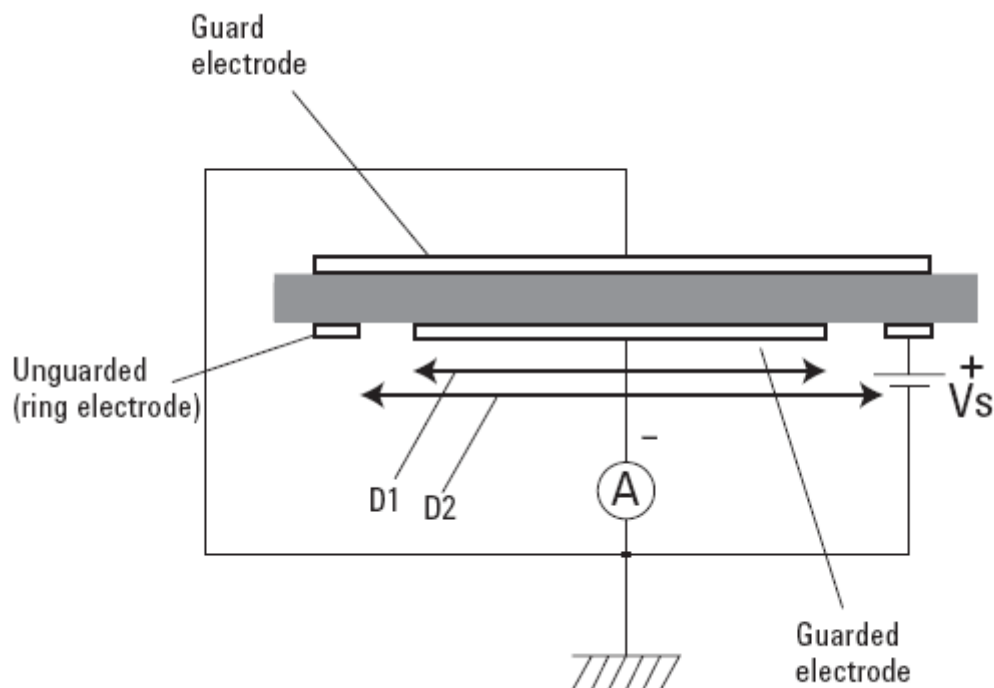


Figura 2.74. Esquema para la medida de resistividad de superficie.

En este caso el voltaje es aplicado entre al electrodo de anillo y el electrodo principal. El electrodo superior actúa como electrodo de guarda. El amperímetro mide la corriente que circula a lo largo de la superficie del material.

La resistividad de superficie es calculada a partir de la resistencia de superficie, el perímetro efectivo del electrodo principal y del electrodo de anillo y el espacio entre el electrodo principal y el electrodo de anillo.

$$\rho_s = \frac{\pi(D_2 + D_1) \times R_s}{D_2 - D_1}$$

Donde: D1: Diámetro del electrodo principal (mm).
 D2: Diámetro del electrodo de anillo (mm).
 Rs: Resistencia de superficie.

En particular, el electrómetro Keithley 6517A, tiene integradas las funciones para el cálculo de la resistencia de volumen y de superficie como secuencia de prueba.

2.4.1.2.3. El método de voltaje constante.

Para hacer medias de alta resistencia usando el método de voltaje constante el instrumento a utilizar debe poder medir pequeñas corrientes y es necesaria una fuente de voltaje constante.

En este método, una fuente de voltaje constante V es colocada en serie con la resistencia a medir y el amperímetro del instrumento. Aplicando la ley de Ohm ($R=V/I$) obtendremos el valor de resistencia desconocido. Este método de tensión constante se utiliza para evitar variaciones del valor de la resistencia.

La figura 2.75 muestra la configuración básica del método de voltaje constante. Se usan electrómetros o picoamperímetros como instrumento de medición.

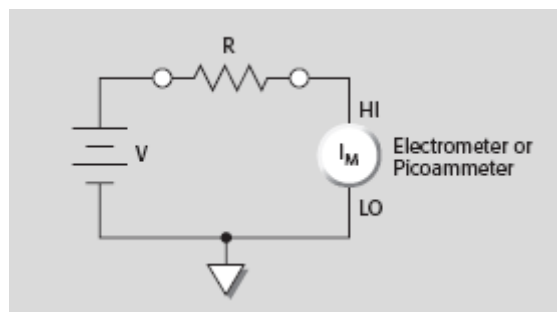


Figura 2.75. Configuración del método de voltaje constante.

En algunos materiales aislantes el valor de su resistencia depende de la intensidad del voltaje aplicado. En estos casos es interesante determinar el valor del coeficiente resistencia/tensión probando distintos voltajes. Así, se puede representar la curva de resistencia frente al voltaje, obteniéndose el coeficiente de tensión de la resistencia. Algunas de las aplicaciones que usan este método incluyen también pruebas

que, midiendo resistencia de aislamiento, determinan la resistencia superficial y volumétrica de materiales aislantes. En el apartado 4.1.4, se desarrollará la aplicación específica del electrómetro Keithley 6517A que permite realizar este tipo de medidas.

Si el coeficiente de voltaje de la resistencia es un parámetro importante, es mejor usar el método de voltaje constante antes que el de corriente constante.

La configuración básica de este método puede realizarse con la aplicación desarrollada en el apartado 4.2.1 de esta memoria. El circuito constaría del SourceMeter Keithley 2410 como fuente de tensión y el picoamperímetro Keithley 6487 para medir corriente.

Algunos electrómetros y picoamperímetros utilizados para medir pequeñas corrientes tienen su propia fuente de voltaje y pueden calcular automáticamente el valor de la resistencia. Es el caso del electrómetro y del picoamperímetro utilizados en este proyecto. El electrómetro Keithley 6517A incorpora una fuente programable de $\pm 1000\text{V}$, pudiendo medir resistencias de hasta $10^{17} \Omega$. El picoamperímetro Keithley 6487 incorpora una fuente de voltaje que proporciona tensiones de $\pm 500 \text{ V}$ sobre el DUT y puede medir corrientes de 20fA . Mide resistencias de hasta $5 \cdot 10^{16} \Omega$ utilizando su fuente de tensión.

Este método está implementado para su uso, en el caso del picoamperímetro 6487, en el programa específico de control del instrumento, que se desarrolla en detalle en el apartado 4.1.3.

Las dos fuentes de error más comunes cuando se realizan mediciones en alta resistencia son las interferencias electromagnéticas y las corrientes de fuga, como se detalló en el apartado 2.2.4. La interferencia electrostática puede ser reducida al mínimo con la utilización del apantallamiento. Las corrientes de fuga pueden ser controladas mediante el uso de conexión de guarda. La figura 2.76 muestra la configuración del método de voltaje constante para eliminar éstas fuentes de error.

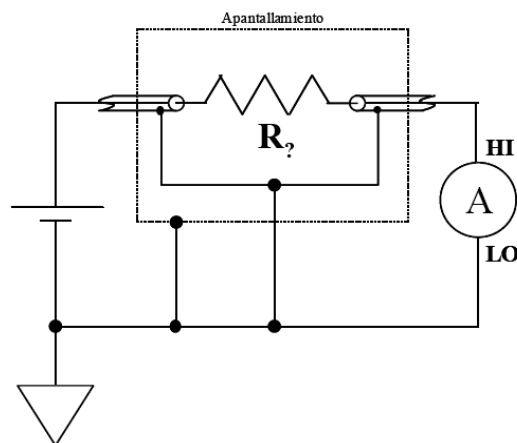


Figura 2.76. Configuración del método de voltaje constante para minimizar los efectos de las fuentes de error.

2.4.1.2.4. El método de corriente constante.

Para hacer medias de alta resistencia usando el método de corriente constante se requiere el uso de un electrómetro actuando como voltímetro y fuente de corriente o solamente un electrómetro actuando como óhmetro.

En este método, una fuente de corriente constante I es colocada en serie con la resistencia a medir. La corriente de la fuente (I) circulará por la resistencia de valor desconocida (R) y la caída de potencial será medida por el electrómetro actuando como voltímetro (V). Aplicando la ley de Ohm ($R=V/I$) obtendremos el valor de resistencia desconocido. Utilizando este método se pueden medir resistencias hasta aproximadamente $10^{12}\Omega$. La impedancia de entrada de un electrómetro típico utilizado como voltímetro es aproximadamente 10^{14} .

La figura 2.77 muestra la configuración básica en el método de corriente constante.

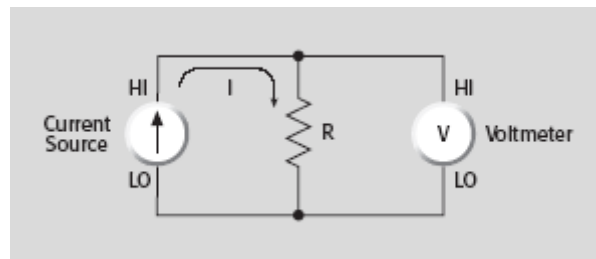


Figura 2.77. Configuración del método de corriente constante.

La configuración básica de este método puede realizarse con un electrómetro Keithley 6517A, configurado como voltímetro y un SourceMeter Keithley 2410, actuando como una fuente de corriente. Este montaje puede ser realizado mediante la aplicación implementada en el apartado 4.2.1.

Este método también puede realizarse mediante el empleo del electrómetro Keithley 6517A en modo de óhmetro. Se desarrolla con la aplicación descrita en el apartado 4.1.4.

Otra posibilidad es utilizar un SourceMeter, ya que tiene un voltímetro con alta impedancia de entrada y rangos de fuente de corriente bajos. Este caso podrá ser desarrollado con la aplicación implementada para el SourceMeter Keithley 2410 en el apartado 4.1.5.

Esta configuración presenta las mismas fuentes de error que el método de voltaje constante. La figura 2.78 muestra la configuración del método de corriente constante para eliminar éstas fuentes de error.

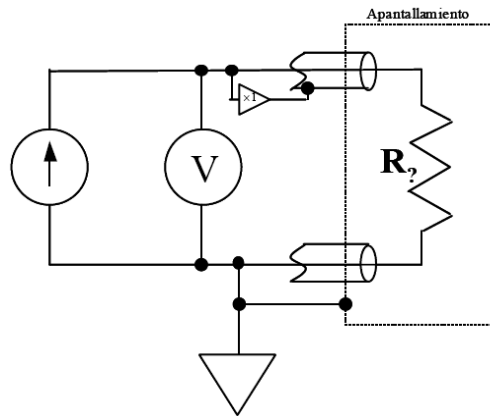


Figura 2.78. Configuración del método de corriente constante para minimizar los efectos de las fuentes de error.

2.4.2. Medidas en dispositivos bajo test (DUT) de baja resistencia.

Si la resistencia del DUT es baja, no se requiere un instrumento de muy alta impedancia de entrada y el factor de limitación viene dado, por la imposibilidad de medir tensiones por debajo de $1\mu\text{V}$ y por las tensiones de offset (descrito en el apartado 2.4.2.1.a).

Se presentan dos objetivos:

- Estudio de la medidas de baja tensión en condiciones de baja resistencia, donde pueden aparecer errores significativos como consecuencia de tensiones de offset e interferencias debidas a diversas fuentes de ruido, como las interferencias magnéticas.
- Estudio de las medidas de baja resistencia para las cuales hay que considerar fuentes adicionales de error que provienen de la resistencia de los cables de medida, de los contactos no óhmicos y del posible calentamiento de los dispositivos bajo prueba.

2.4.2.1. Medidas de baja resistencia y baja tensión.

La medida de R ($<10\ \Omega$) puede ser realizada con baja corriente ($10\mu\text{A}$) y un nanovoltímetro. Para medir bajas resistencias sin disipar demasiada potencia en el DUT es necesario un instrumento con gran sensibilidad midiendo tensión. Lo más común sería una fuente de corriente pequeña (SourceMeter) y un nanovoltímetro.

Hay errores significativos que pueden ser introducidos en medidas de bajo voltaje, como los voltajes de offset y fuentes de ruido que serían ignoradas al medir alto voltaje. A continuación se explican diversos factores que pueden afectar la precisión en la medida de baja tensión.

- Factores que influyen en la medida de baja tensión:

a) Voltaje de offset.

Cuando se conecta un voltímetro a un circuito de baja impedancia o DUT se observan lecturas distintas de cero incluso cuando la fuente de tensión se desconecta o cortocircuita. Una señal de entrada nula en un voltímetro digital no implica una indicación igual a cero, ya que si se cortocircuitan las entradas de un amplificador operacional aparece una tensión residual en su salida, denominada tensión de offset. Esta situación afecta las mediciones de baja tensión. La figura 2.79 muestra el efecto del voltaje de offset en la medida de voltaje en baja tensión.

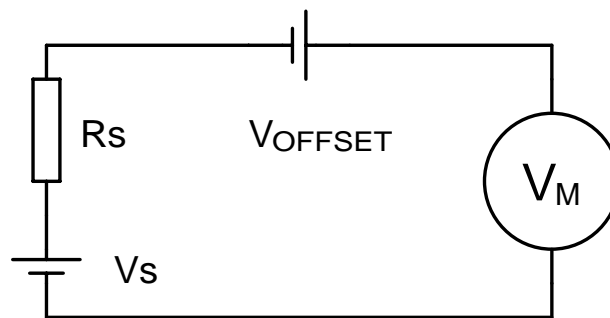


Figura 2.79. Efecto del voltaje de offset en la medida de voltaje en baja tensión.

La ecuación de malla en este circuito es:

$$V_M = V_S \pm V_{OFFSET}$$

Donde:

- V_M = tensión medida.
- V_S = tensión de fuente.
- V_{OFFSET} = tensión de offset.

Los instrumentos raramente dan una lectura cero incluso manteniendo la entrada cortocircuitada, debido a este offset interno del instrumento.

Puede ser suprimido mediante un ajuste interno activado por la función “Zero” (pone a cero la indicación de la pantalla) o por la función “Rel” (muestra medidas relativas respecto del actual valor) del panel frontal de nuestros instrumentos.

Usualmente el offset interno varía con la temperatura, por ello debe mantenerse el instrumento funcionando un tiempo suficiente denominado “tiempo de calentamiento”, que puede ser de hasta dos horas, antes de realizar al proceso de supresión anteriormente citado.

b) Potenciales termoeléctricos.

Los potenciales termoeléctricos (EMF) tienen su origen en la unión de dos conductores diferentes con presencia de gradientes térmicos. Los potenciales termoeléctricos pueden afectar a la precisión de la medida de baja resistencia. La figura 2.80 muestra un esquema donde se generan potenciales termoeléctricos debidos al efecto Seebeck (efecto termopar).

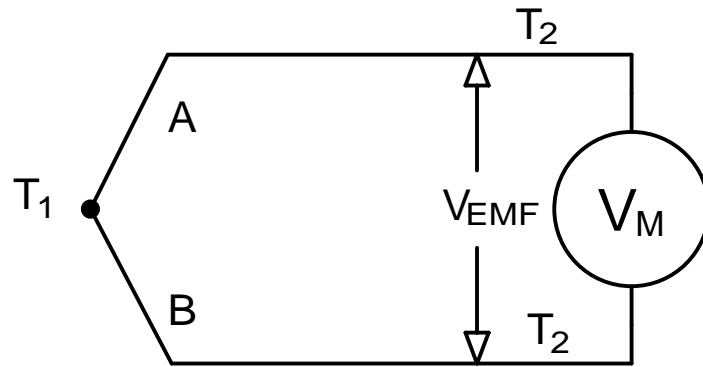


Figura 2.80. Potenciales termoelectricos.

Analizando este circuito obtenemos:

$$V_{EMF} = Q_{AB} (T_1 - T_2)$$

Donde: · V_{EMF} = tensión termoelectrica.

· Q_{AB} = coeficiente Seebeck del material A con respecto a B [$\mu V/^{\circ}C$].

· T_1 = temperatura 1.

· T_2 = temperatura 2.

Q_{AB} es el coeficiente de Seebeck característico de cada par de materiales. La tabla 2.15 muestra los valores de este coeficiente para varios pares de materiales.

MATERIALES	Coeficiente de Seebeck Q_{AB}
Cu – Cu	$\leq 0,2 \mu V/K$
Cu – Ag	$0,3 \mu V/K$
Cu – Au	$0,3 \mu V/K$
Cu – Pb/Sn	$1 - 3 \mu V/K$
Cu – Si	$400 \mu V/K$
Cu – Kovar	$40 - 70 \mu V/K$
Cu – CuO	$1000 \mu V/K$

Tabla 2.15. Coeficiente de Seebeck para varios materiales.

Kovar es una aleación especial (cobalto, níquel y hierro) utilizada frecuentemente para la fabricación de termopares.

Para minimizar el efecto de los potenciales termoelectricos se deben seguir las siguientes pautas:

- Construir el circuito de medida utilizando los mismos materiales conductores, limpios, libres de óxido y sin soldaduras con aportación de otros materiales.

- Eliminar los gradientes de temperatura entre las distintas partes del circuito utilizando elementos adecuados de refrigeración y acoplo térmico.
- No realizar las medidas hasta que se haya alcanzado el equilibrio térmico de los diversos componentes del circuito. Para ello se debe utilizar un adecuado control de la temperatura ambiente y de los dispositivos del circuito.

La figura 2.81 muestra un ejemplo en el que aparecen diversas fuentes de potencial termoelectrico debidas a las conexiones de materiales distintos entre la fuente y el instrumento de medida.

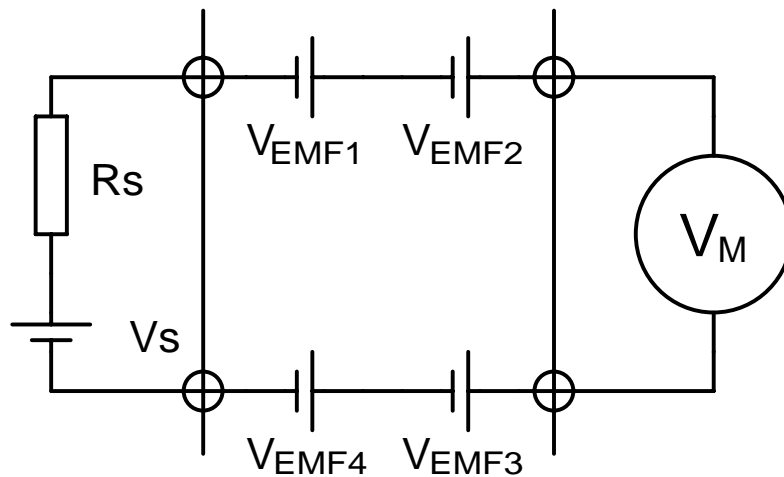


Figura 2.81. Ejemplo de potenciales termoelectricos debido a las conexiones.

Para cancelar el potencial termoelectrico se emplean dos métodos: el método de inversión de polaridad y el de supresión de la fuente de corriente.

- *Cancelación de potenciales termoelectricos mediante inversión de polaridad.*

El método de cancelación del potencial termoelectrico mediante inversión de polaridad consiste en realizar dos medidas, cada una de ellas con una polaridad distinta en las fuentes de tensión empleadas. El promedio de la diferencia entre las dos lecturas obtenidas es la diferencia de voltaje deseada. La figura 2.82 muestra este método para cancelar el potencial termoelectrico.

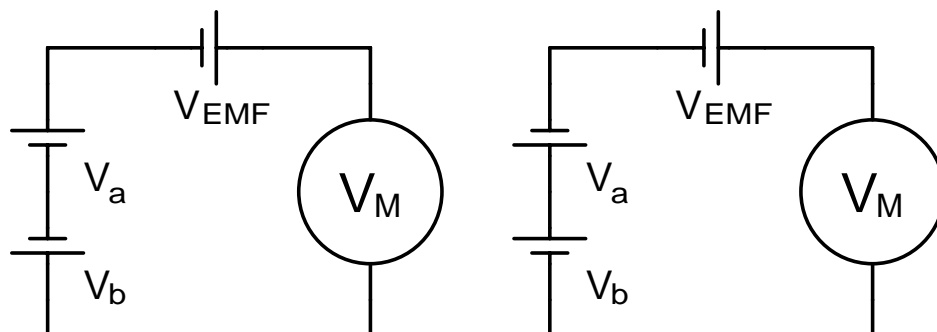


Figura 2.82. Cancelación del potencial termoelectrico con inversión de polaridad.

Analizando estos circuitos obtenemos:

$$V_1 = V_{EMF} + V_a - V_b$$

$$V_2 = V_{EMF} + V_b - V_a$$

$$\frac{V_1 - V_2}{2} = \frac{V_{EMF} + V_a - V_b - V_{EMF} - V_b + V_a}{2} = V_a - V_b$$

La figura 2.83 muestra el mismo método de inversión de polaridad para el caso de una fuente de corriente. El promedio de la diferencia de las medidas obtenidas, que consigue eliminar los potenciales termoeléctricos, es el valor de voltaje deseado. Se puede calcular el valor de la resistencia R aplicando la ley de Ohm.

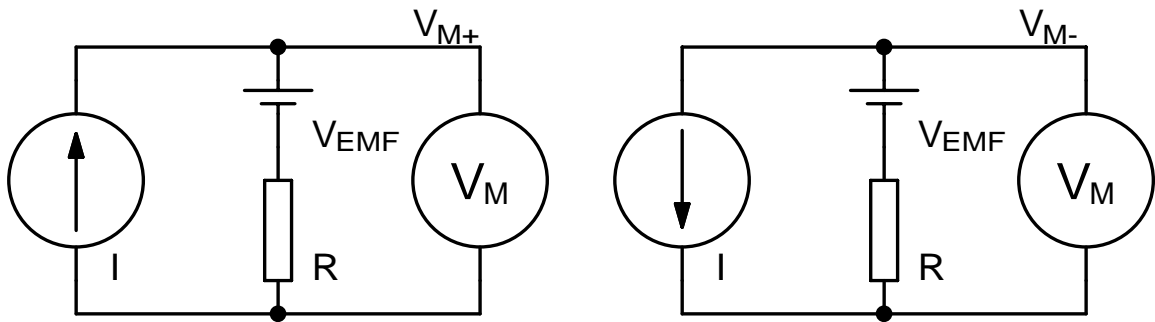


Figura 2.83. Medida con polaridad positiva y negativa para la cancelación de los potenciales termoeléctricos.

Analizando estos circuitos obtenemos:

$$V_{M+} = V_{EMF} + IR$$

$$V_{M-} = V_{EMF} - IR$$

$$V_M = \frac{V_{M+} - V_{M-}}{2} = IR$$

$$R = \frac{V_M}{I}$$

- *Cancelación de potenciales termoeléctricos mediante supresión de la fuente de corriente.*

Otro método utilizado en la cancelación del offset cuando se utiliza el micro-ohmetro y muchos multímetros digitales es el método de supresión de la fuente de corriente. Este método es similar al de inversión de polaridad pero las medidas son alternadas entre una fuente de corriente fija y otra de cero corriente.

La figura 2.84 muestra la medida con conexión y desconexión de la fuente de corriente para la cancelación de los potenciales termoeléctricos.

La corriente de la fuente es aplicada a la resistencia sólo durante una parte del ciclo. Cuando la corriente de la fuente está conectada, el voltaje medido total es:

$$V_{M1} = V_{EMF} + IR$$

Durante la segunda mitad del ciclo de medida, la corriente de la fuente está desconectada y el único voltaje presenta en la medida es:

$$V_{M2} = V_{EMF}$$

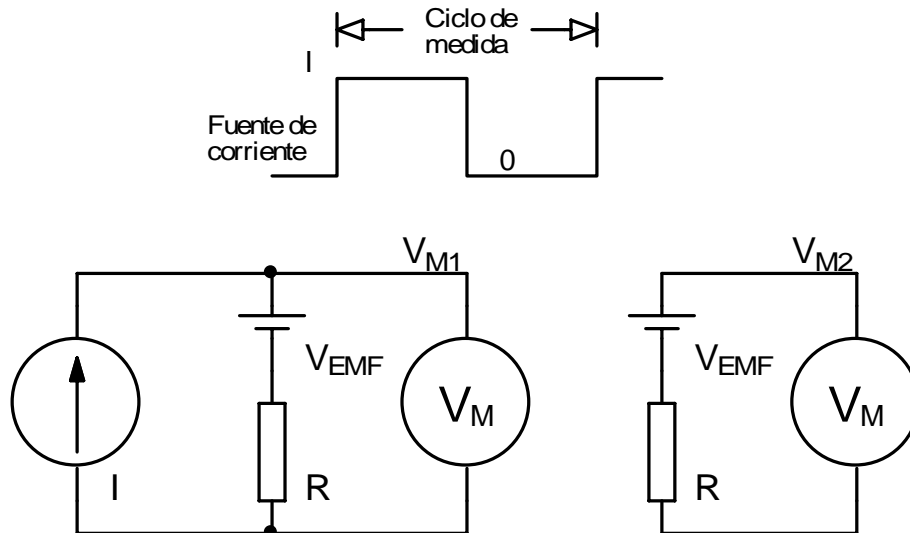


Figura 2.84. Medida con conexión - desconexión de la fuente de corriente para la cancelación de los potenciales termoeléctricos.

Teniendo en cuenta que los potenciales termoeléctricos (V_{EMF}) son medidos con precisión durante la segunda mitad del ciclo, pueden ser restados de la medida de voltaje realizada durante la primera mitad del ciclo:

$$V_M = V_{M1} - V_{M2}$$

$$V_M = (V_{EMF} + IR) - V_{EMF}$$

De este modo el potencial termoeléctrico se cancela y obtenemos el valor verdadero de la resistencia R :

$$R = \frac{V_M}{I}$$

c) Ruido Johnson.

El movimiento de los electrones sobre los conductores es de tipo completamente aleatorio produciendo ruido Johnson. Aparece en cualquier lugar donde exista resistencia eléctrica, tal y como se describió en el apartado 2.2.4.8.

d) Interferencias electromagnéticas (EMI).

Las interferencias electromagnéticas producidas por sistemas emisores de perturbaciones electromagnéticas pueden ocasionar mediciones erráticas, tal y como fue contado en el apartado 2.2.4.10.

e) Interferencias magnéticas.

Los campos magnéticos pueden generar voltajes de error, como se especificó en el apartado 2.2.4.9.

f) Lazos de tierra.

Los lazos de tierra originan ruido y voltajes erróneos, como se explicó en el apartado 2.2.4.6.

g) Corrientes en modo común.

Las corrientes en modo común se generan normalmente entre el terminal LO del instrumento y su chasis, que está conectado a tierra. La figura 2.85 muestra las corrientes en modo común debidas al insuficiente aislamiento entre el primario y secundario del transformador de alimentación del instrumento.

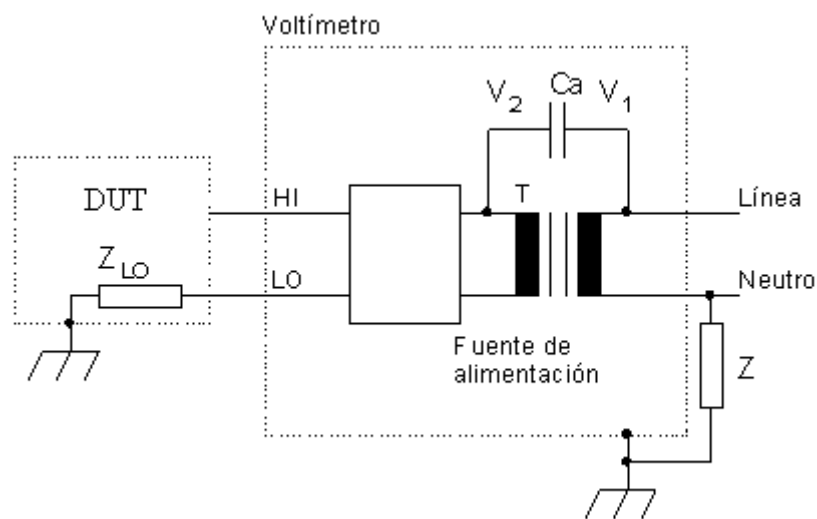


Figura 2.85. Ejemplo de corrientes en modo común.

La amplitud de la corriente de modo común se define como:

$$I_{CM} = 2\pi f C_a (V_2 \pm V_1)$$

Donde f es la frecuencia de línea.

Para minimizar en lo posible este efecto se debe de garantizar la correcta conexión del DUT a los terminales de entrada del instrumento de medida. La figura 2.86 muestra una correcta conexión a los terminales de entrada del instrumento de medida, mientras que la figura 2.87 muestra la incorrecta conexión para el mismo ejemplo.

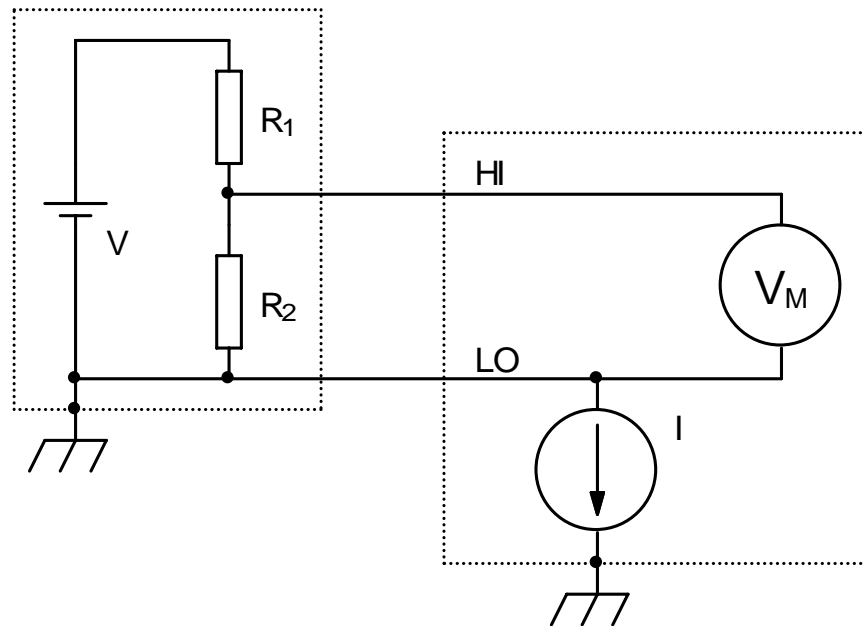


Figura 2.86. Correcta conexión a los terminales de entrada del instrumento de medida.

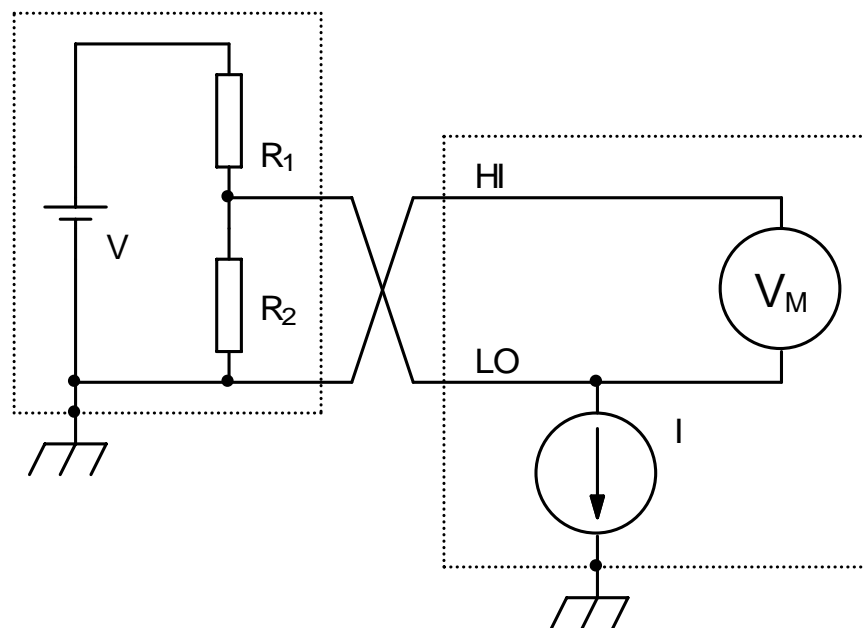


Figura 2.87. Incorrecta conexión a los terminales de entrada del instrumento de medida.

En cualquier caso, para reducir los efectos de la corriente en modo común siempre es posible aislar convenientemente el DUT del potencial de tierra. De este modo se corta el camino de retorno de la corriente en modo común. La figura 2.88 muestra el conveniente aislamiento del DUT.

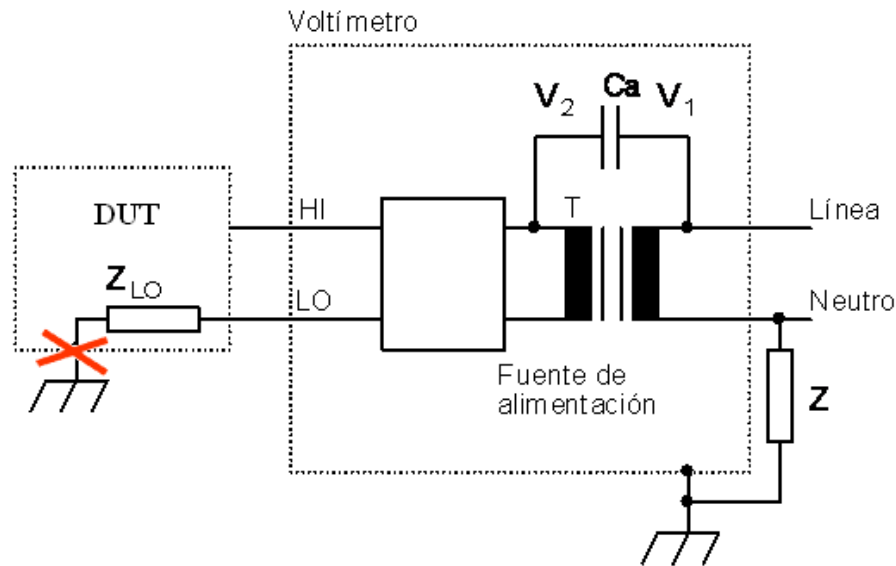


Figura 2.88. Aislamiento del dispositivo bajo prueba.

h) Efecto de los contactos no óhmicos.

Los contactos no óhmicos corresponden a uniones entre conductores que permanecen cubiertos de láminas de óxido. De este modo se consiguen conexiones no lineales que se pueden comportar como un rectificador de señales alternas (campos magnéticos, EMI, etc.) generando offset de tensión continua.

Para reducir este efecto se deben de utilizar contactos limpios libres de óxido o materiales nobles como el indio o el oro.

i) Efecto del calentamiento de los dispositivos.

Muchos componentes resistivos presentan una característica que hace que su valor de resistencia cambie con la temperatura. Por este motivo, se ha de evitar el calentamiento del dispositivo bajo prueba durante la medida controlando la temperatura ambiente y, fundamentalmente, evitando pérdidas importantes por efecto Joule en la resistencia. Se debe, por tanto, realizar la medida con la menor corriente o durante el menor tiempo posible (one-shot trigger mode).

La figura 2.89 muestra un gráfico comparativo de la magnitud de las tensiones de error generadas por los distintos efectos descritos anteriormente.

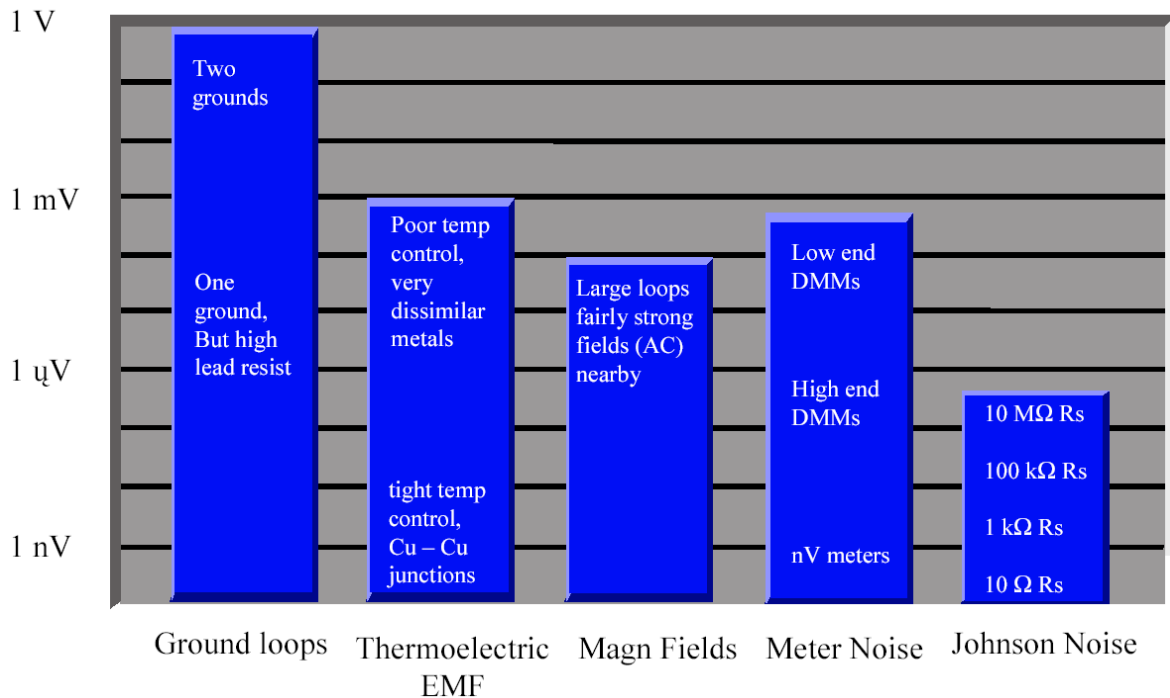


Figura 2.89. Magnitud de las tensiones de error.

2.4.2.2. Métodos de medida de baja resistencia.

Para medir valores de resistencia pequeños ($<10\Omega$) se puede utilizar una fuente de corriente alta (100mA, 1A) y medir la tensión generada en la resistencia.

Debido al pequeño valor de resistencia a medir, no es necesario apantallamiento de cables o conexiones.

Para realizar medidas de baja resistencia debemos emplear el SourceMeter, como el Keithley 2410, y el micro-óhmetro, ya que son los instrumentos que realizan este tipo de medidas con precisión.

Es necesario evitar el problema que surge cuando se produce autocalentamiento en la resistencia, puesto que puede cambiar de valor durante la medida.

Un método eficaz para realizar medidas de baja resistencia es, como se ha mencionado, el que utiliza una fuente de corriente y un medidor de tensión. Al medir pequeñas resistencias se observarán pequeñas tensiones en el circuito.

2.4.2.2.1. Medidas de resistencias a dos puntas.

Las medidas de resistencia pueden ser realizadas usando el método a dos puntas mostrado en la figura 2.90. La corriente de prueba circula por el circuito y el valor de Resistencia (R) es medido. La corriente (I) es la misma en todos los puntos del circuito dado que todos los elementos están en serie. En los casos en los que la resistencia de los cables R_C es despreciable frente a la resistencia a medir R, la resistencia calculada es indicativa del valor real de la resistencia R.

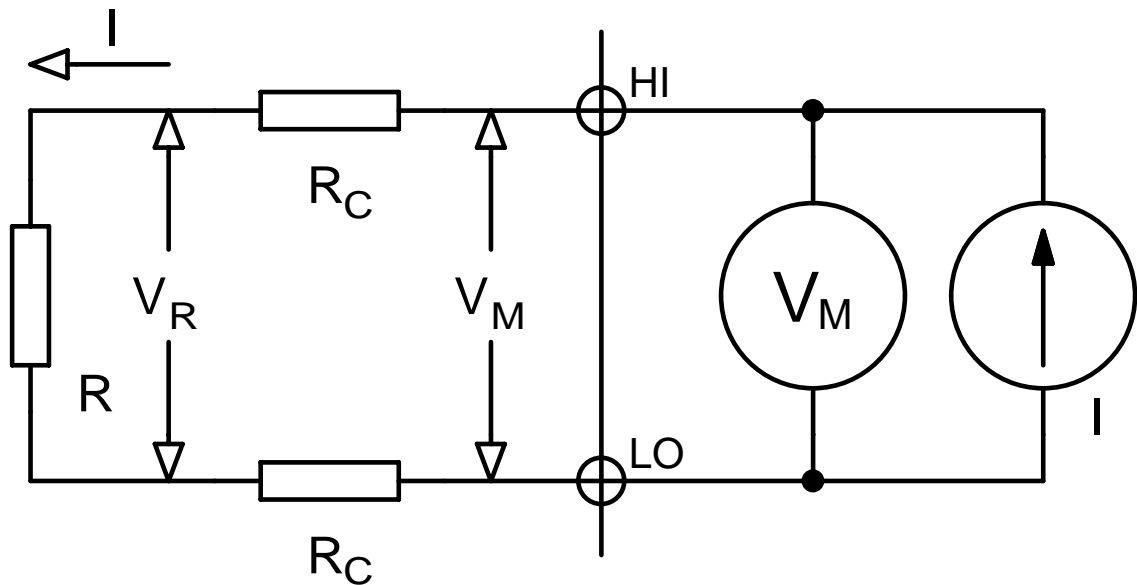


Figura 2.90. Esquema de medida de resistencia a dos puntas.

$$\text{Resistencia medida} = R_M = \frac{V_M}{I} = R + 2R_C$$

Donde: V_M = Voltaje obtenido por el instrumento medidor.
 V_R = Voltaje de la resistencia R .

El principal problema del método a dos puntas cuando es aplicado a medidas de baja resistencia, es que la resistencia total de los cables y/o conexiones (R_C) está presente en la medida. Una vez introducida la corriente de prueba (I), se produce una pequeña pero significativa caída de potencial en la resistencia que ofrece el cable de conexión. El voltaje medido (V_M) por el instrumento no será exactamente el mismo que el valor de voltaje (V_R) que pasa a través de resistencia bajo prueba R , produciéndose un error en el resultado.

Los valores típicos de resistencia de los cables que provocan estos errores están en el rango de $1\text{m}\Omega$ a $10\text{m}\Omega$, por lo que es muy difícil de obtener, con el método a dos puntas, medidas precisas de resistencia cuando la resistencia bajo prueba es inferior a 10Ω ó a 100Ω (dependiendo de la resistencia de los cables).

2.4.2.2.2. Medidas de resistencias a cuatro puntas.

El método a cuatro puntas es el método más indicado para medidas de baja resistencia ya que elimina los efectos de la resistencia de los cables y sus conexiones. Cualquier caída de tensión en los cables no será medida por el instrumento. Existen pinzas de conexión especiales (llamadas pinzas Kelvin) para facilitar esta clase de conexión a una resistencia. La figura 2.91 muestra el esquema para medida de resistencia a cuatro puntas.

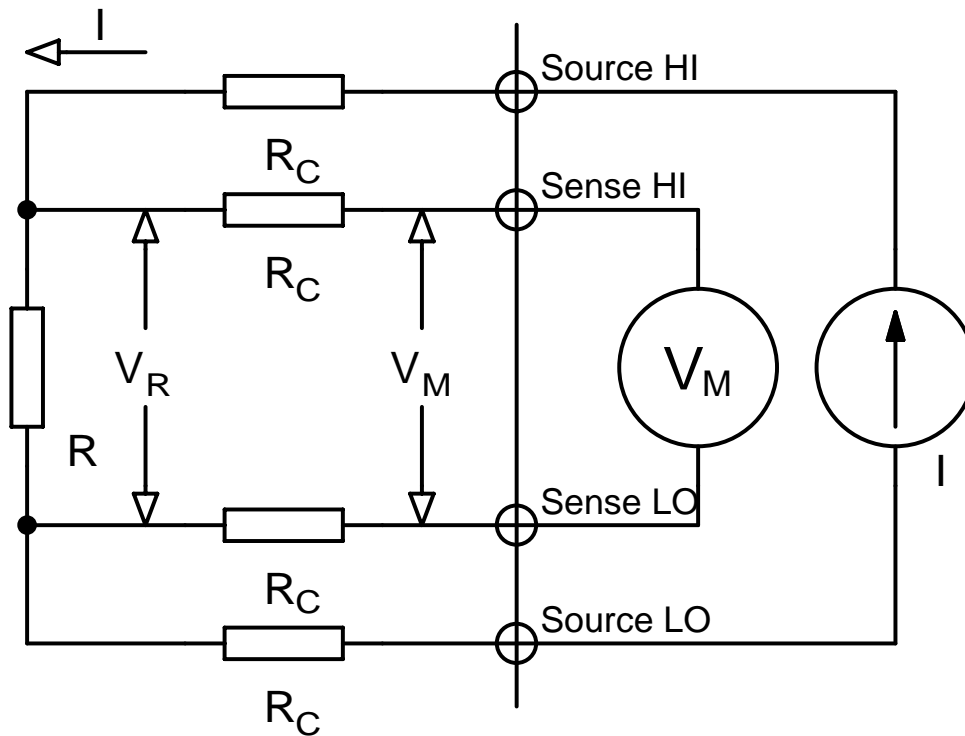


Figura 2.91. Esquema para medida de resistencia a cuatro puntas.

$$\text{La resistencia medida} = R = \frac{V_R}{I} = \frac{V_M}{I} = R_M$$

Donde: V_M = Voltaje obtenido por el instrumento medidor.
 V_R = Voltaje de la resistencia R .

Con esta configuración, se fuerza a que la corriente de prueba (I) pase por la resistencia a medir (R) a través del cableado de fuente (Source), mientras que el valor de voltaje a medir V_M es realizado a través del cableado de detección (Sense).

Aunque alguna pequeña corriente puede fluir por los cables de detección (Sense), es por lo general insignificante y puede ser ignorada prácticamente como norma general. El voltaje obtenido por el medidor (V_M) es esencialmente el mismo voltaje V_R que se obtiene en la resistencia R . De este modo, el valor de la resistencia puede ser determinado con mucha más precisión que con el método a dos puntas.

Cuando usamos el método a cuatro puntas, la diferencia de voltaje entre “Source HI” y “Sense HI” y entre “Source LO” y “Sense LO” está delimitada a un valor específico. Cuando se excede esta diferencia de voltaje puede darse un resultado en la medida incorrecto.

En caracterización del DUT, la medida de resistencia con este método se realiza situando cuatro contactos eléctricos sobre la superficie del DUT. El método a cuatro puntas es importante al medir la resistencia de materiales semiconductores que implican la medición de voltajes bajos. La resistencia de la sonda metálica al contacto del semiconductor puede ser bastante alta. También es importante al medir la resistencia de materiales superconductores.

Las medidas en este método pueden ser realizadas por un multímetro digital, un SourceMeter o un micro-óhmetro. También se pueden usar una fuente de corriente y un voltímetro.

2.5. Otros circuitos de medidas.

2.5.1. Medidas de carga eléctrica. Electrómetro.

La carga es la integral respecto al tiempo de la corriente eléctrica, $q = \int idt$. Es una medida que se realiza referida a una cantidad de partículas cargadas que atraviesan una superficie por unidad de tiempo o también es referida a un componente, como un condensador, donde se mide la carga eléctrica que ha sido almacenada en él.

El electrómetro es un instrumento que puede ser utilizado en medida de carga, es decir, como un coulombímetro, pues presenta una corriente de offset de entrada muy baja que no altera la transferencia de carga durante cortos intervalos de tiempo, además al presentar una alta impedancia de entrada permite obtener la carga (Q) integrando en el tiempo la corriente a la entrada del mismo.

Para un condensador cargado: $Q = C \cdot V$, donde Q es la carga del condensador en culombios, C es la capacidad en faradios y V es el voltaje en los terminales del condensador. Usando esta relación, la medida de carga consiste en transferir la carga a medir a un condensador de valor conocido y obtener la diferencia de potencial en éste. La carga se calcula a partir de: $Q = C \cdot V$.

La función de coulombímetro del electrómetro puede ser usada con una fuente de tensión de paso (con valores V_1 y V_2) para medir capacitancia. Esta técnica es útil en la medida de la capacidad de cables y conectores ya que puede medir capacidades en el rango valor < 10 pF a unos cientos de nanofaradios. La capacidad desconocida se conecta en serie con la entrada del electrómetro y con la fuente de voltaje de paso, como se muestra en la figura 2.92. La capacidad se obtiene dividiendo el valor de Q medido entre el voltaje de la fuente para los valores V_1 y V_2 .

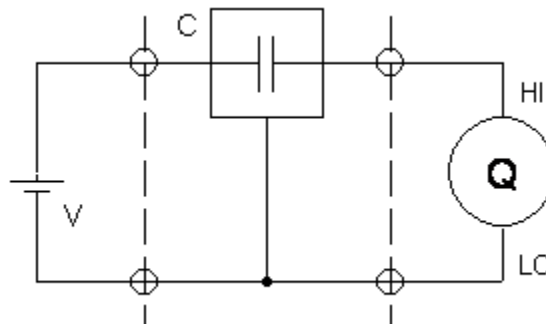


Figura 2.92. Esquema básico de medida de capacidad con un electrómetro midiendo carga.

El electrómetro Keithley 6517A utiliza para esta medida su fuente interna (V) que permite fijar el voltaje de paso (V_1 y V_2) al utilizar la configuración de medida como carga (coulombímetro). Justo antes de activar la fuente, se debe deshabilitar “Zero Check” del instrumento y suprimir las lecturas de carga usando la función REL o la función Zero. Entonces, se activará la fuente de voltaje y la carga será medida inmediatamente, obteniendo, a partir de la siguiente fórmula, la capacidad:

$$Q_2 - Q_1 = C(V_2 - V_1)$$

Para evitar interferencias electrostáticas durante la medida el condensador se suele situar en el interior de una caja apantallada conectada al terminal LO.

2.5.1.1. Medida de muy bajas corrientes.

En muchos casos se utiliza un amperímetro o un picoamperímetro para medidas de corriente. Sin embargo, para corrientes del orden de femtoamperios (10^{-15}A) es más recomendable emplear la función de medida de coulombios del electrómetro y medir el cambio de la carga en el tiempo.

La figura 2.93 muestra un esquema simplificado para medida de corriente con un electrómetro a partir de la función de coulombímetro. La corriente de entrada al circuito es I .

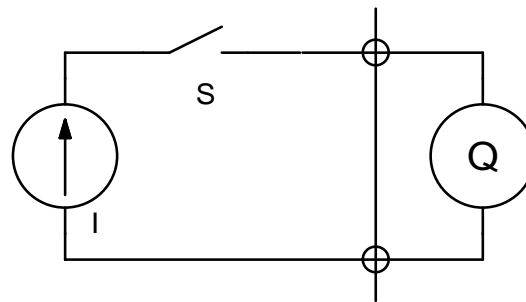


Figura 2.93. Esquema para la medida de muy bajas corrientes con un electrómetro a partir de la función de coulombímetro.

La corriente media (I) se calcula a partir del cambio en voltaje de salida sobre un período de tiempo específico:

$$I = \frac{C \Delta V}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Si escogemos un intervalo de tiempo entre medidas de un segundo entonces el cambio de carga es igual que la corriente de entrada.

2.5.2. Medidas de coeficiente de voltaje en sistemas de alta resistencia.

Los DUT con altos valores de resistencia pueden presentar un cambio significativo de su valor cuando una señal de voltaje es aplicada en sus terminales. Este efecto es conocido como coeficiente de voltaje, siendo un porcentaje de cambio en la resistencia por voltio aplicado. Viene dado por la siguiente expresión:

$$\text{Coeficiente de voltaje (\%/V)} = \frac{(R_2 - R_1)}{R_1} \times \frac{1}{(V_2 - V_1)_1} \times 100\%$$

El coeficiente de voltaje también se puede expresar en ppm de la siguiente manera:

$$\text{Coeficiente de voltaje (ppm/V)} = \frac{(R_2 - R_1)}{R_1} \times \frac{1}{(V_2 - V_1)_1} \times 10^6$$

Donde: R_1 = resistencia calculada al aplicar V_1 .

R_2 = resistencia calculada al aplicar V_2 .

$V_2 > V_1$.

Valores de resistencia de $10\text{G}\Omega$ presentan un coeficiente de voltaje de aproximadamente -0.008 \%/V ó -80ppm/V .

La medición del coeficiente de voltaje de una alta resistencia requiere una fuente de voltaje y la medida de una baja corriente. Un electrómetro es requerido para hacer este tipo de medidas. El instrumento Keithley 6517A tiene implementado una secuencia de prueba para determinar el coeficiente de voltaje. Se realiza la medida de resistencia en dos niveles de voltaje diferentes para posteriormente calcular el coeficiente de voltaje.

En la figura 2.94 se muestra la configuración típica de prueba para el cálculo del coeficiente de voltaje con el electrómetro Keithley 6517A. Para minimizar ruido y fugas, la resistencia se suele situar en el interior de una caja apantallada conectada al terminal LO del electrómetro.

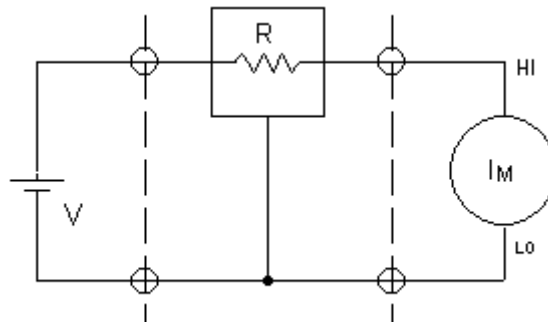


Figura 2.94. Prueba para cálculo de coeficiente de voltaje con un electrómetro Keithley 6517A utilizando su propia fuente V y configurado en modo de medida de corriente.

El coeficiente de voltaje se calcula a partir de los valores de resistencia medidos para dos valores de voltaje, donde $V_2 > V_1$.

La resistencia es medida en primer lugar con el nivel de voltaje V_1 , obteniéndose R_1 . Posteriormente es configurado el nivel de voltaje V_2 , obteniéndose R_2 (con $V_2 > V_1$). El coeficiente de voltaje es calculado a partir de estos valores obtenidos y la ecuación anteriormente descrita.

2.6. Medidas de temperatura.

2.6.1. Termopares. Tipo K.

Los diferentes métodos para la medición de temperatura se basan en las alteraciones que ésta provoca en determinados materiales, por lo que se miden los cambios producidos como consecuencia de la temperatura.

En nuestro caso, el termopar es un dispositivo capaz de transformar las variaciones de energía térmica en variaciones de energía eléctrica. No necesita una energía adicional para realizar dicha conversión, es decir, son transductores autónomos o activos. El termopar está constituido por dos conductores (metales) diferentes unidos eléctricamente por uno de sus extremos. Esta unión recibe el nombre de unión caliente o unión sensora, por ser la que se encuentra a la temperatura a medir. Los otros dos extremos (uno de cada conductor) estarán a una misma temperatura que es la de referencia (unión de referencia).

Los termopares generan una diferencia de potencial proporcional a la diferencia de temperatura entre sus uniones (sensora y de referencia), que sirve para realizar la medida de temperatura. El efecto Seebeck es el principio de funcionamiento de los termopares. Dicho efecto consiste en que si se tienen dos metales distintos unidos por sus dos extremos (termopar) y los calentamos de forma que se mantenga una diferencia de temperatura entre las uniones, aparece una diferencia de potencial, y en consecuencia, una corriente en el circuito formado por los metales.

El termopar tipo K, utilizado en nuestro proyecto, está estandarizado de modo que la tensión que debe generar para las diferentes temperaturas queda registrada en una tabla. Presenta un rango de temperatura de -270°C a $+1.370^{\circ}\text{C}$, presentando una buena resistencia a la oxidación. Tiene una sensibilidad $41\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ aproximadamente. La figura 2.95 muestra el esquema de un termopar tipo K.

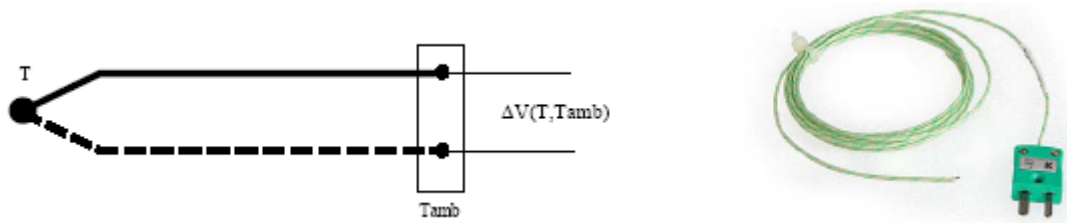


Figura 2.95. Esquema de termopar tipo K y la sonda real.

2.6.2. Módulo de temperatura.

En los programas implementados está presente un módulo que permite medir temperatura denominado *módulo de temperatura*. Debemos contar con un termopar tipo K y un instrumento que mida la diferencia de potencial generada por el termopar, normalmente el multímetro Agilent 34401A o el nanovoltímetro Keithley 182.

Este módulo devuelve un valor de temperatura calculado a partir de un polinomio, que aproxima las tablas de conversión del termopar tipo K, mediante un proceso de comparación con el valor de voltaje medido en el termopar. En el bloque 2

del apartado 3.6 se puede observar el panel frontal de este módulo que será explicado con detalle en el apartado 3.7.1.

Todos nuestros programas en los que se realiza medida de temperatura cuentan con un control llamado *Lab Temp*, en el que se debe introducir la temperatura ambiente del laboratorio y que sirve para compensar el hecho de que la temperatura de referencia sea la ambiente y no 0°C. La corrección, por tanto, se realiza por software.

2.6.3. Horno vertical.

2.6.3.1. Características del horno.

Se dispone de un horno de tubo vertical cerrado por uno de sus extremos, marca Hobersal y modelo ST-115020-HV, para la caracterización eléctrica y dieléctrica del DUT en función de la temperatura. Las principales características de este horno son:

- Longitud de zona calefactora: 200 mm.
- Diámetro ext. Tubo: 50 mm.
- Medidas exteriores (alto x ancho x fondo): 400 x 400 x 350 mm.
- Potencia: 2,5 kw.
- Peso neto: 40 kg.

El horno dispone de un regulador de temperatura, marca Fuji Electric y modelo PXR-4, para su control. La figura 2.96 muestra el horno, sujetado por su pie de apoyo y el regulador de temperatura que lo controla.



Figura 2.96. Horno vertical con regulador de temperatura.

El regulador dispone de un termopar tipo K, situado a media altura en la pared interior del horno, para la medida de la temperatura.

El horno permite una temperatura máxima de trabajo continuo de 900°C, aunque la temperatura máxima que se puede alcanzar es de 1100°C.

Se diseñó un porta-muestras (véase figura 2.97) que permite introducir el DUT (muestra) en la cavidad interior del horno. Este porta-muestras dispone de los elementos necesarios para sujetar el DUT. Permite excitarla eléctricamente y medir sobre ella, presentando cuatro conectores BNC blindados de alta impedancia. Presenta un cabezal refrigerado roscado, formado por un núcleo de macor revestido de una pieza metálica de latón, que permite su sujeción a la boca del horno. Monta un termopar tipo K en contacto con el DUT que permite medir su temperatura.

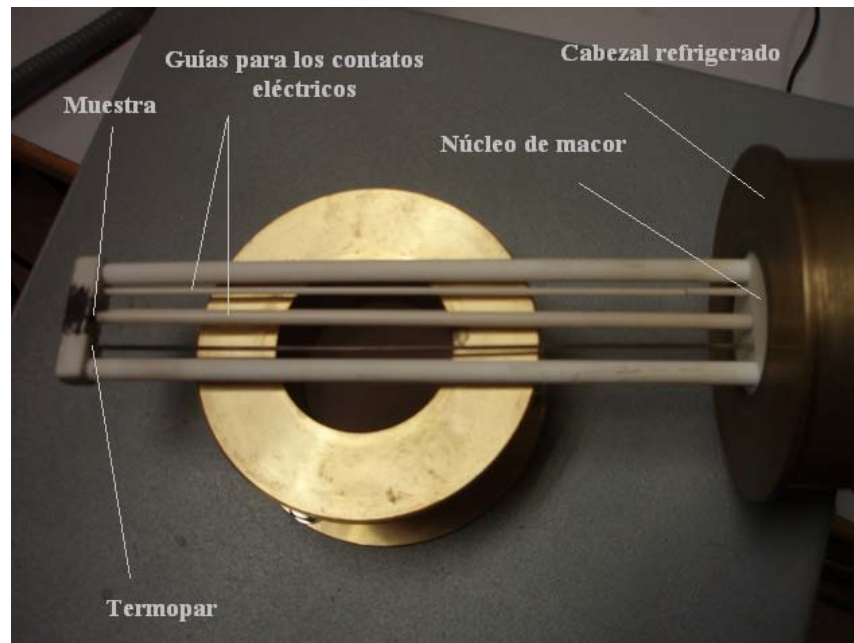


Figura 2.97. Porta-muestras junto a la boca de entrada del horno.



2.6.3.2. Regulación de temperatura. Control PXR-4.

Para el control del horno se utiliza un regulador de temperatura de Fuji Electric, modelo PXR-4 (véase figura 2.98), que se encarga de controlar la potencia eléctrica que se suministra al horno hasta alcanzar la temperatura deseada.






Figura 2.98. Regulador de temperatura Fuji PXR-4.


En el panel del regulador podemos distinguir:

1. PV: visualización de la temperatura interior del horno. Es medida a partir del termopar tipo K situado en la pared interior del horno.
2. Piloto de indicación del valor de la temperatura de consigna (SV). El piloto se enciende mientras se visualiza un valor de temperatura de consigna.
3. SV: Visualización de la temperatura de consigna a alcanzar.
4. Tecla de selección (“SEL”).
5. Tecla arriba ().
6. Tecla abajo ().
7. Piloto de indicación de auto-tuning. El piloto parpadea mientras se está realizando el auto-tuning del PID.
- 8, 9, 10. Pilotos de indicación de alarmas (AL3, AL2, AL1).
- 11, 12. Pilotos de indicación de salidas de control (C2, C1).


- Menú del controlador

El menú del controlador se compone de tres bloques, a los cuales se puede acceder por medio de la tecla . En función del tiempo durante el cual se presiona la tecla *Sel* se accede a uno de estos bloques. Si se presiona durante 1 segundo aproximadamente se accede al 1^{er} bloque. Si se presiona durante 3 segundos aproximadamente se accede al 2^o bloque. Si se presiona durante 5 segundos aproximadamente se accede al 3^{er} bloque.

Dentro de cada bloque podemos seleccionar el parámetro que se desee configurar presionando la tecla  o .

Una vez que se visualiza en pantalla el parámetro, se presiona la tecla  para poder cambiarlo (el parámetro parpadea).

Se presiona la tecla  o  para cambiar el valor del parámetro.

Tras cambiar el parámetro, se presiona la tecla  para registrarlo. Los nuevos valores se registran automáticamente en 3 segundos.

- Programador de rampas/mantenimientos.

El controlador dispone de un modo de funcionamiento de rampa/mantenimiento que permite programar 8 rampas/mantenimientos (véase la figura 2.99) y así poder realizar medidas de caracterizaciones eléctricas para 8 valores estables de temperatura en un solo proceso.

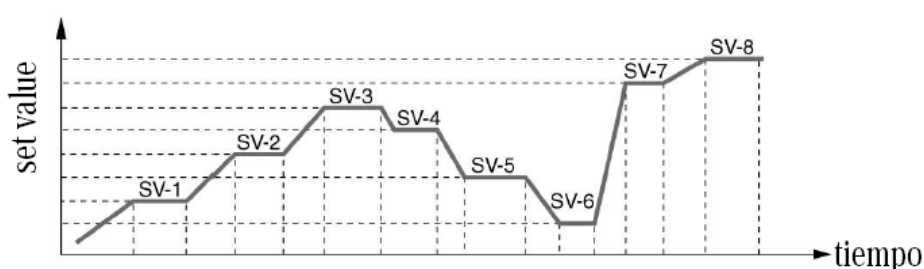


Figura 2.99. Rampa programable de 8 niveles para el horno.

Para programar las 8 rampas/mantenimientos se deben introducir 24 valores:

- 8 valores de temperatura.
- 8 valores correspondientes a los tiempos de subida.
- 8 valores correspondientes a los tiempos de mantenimiento.

Para introducir los 24 valores hay que acceder al 2º bloque de parámetros (presionando durante 3 segundos la tecla *SEL*) del controlador seleccionando los siguientes parámetros:

- **SV-1**: configura la temperatura de consigna de la rampa/mantenimiento 1.
- **FN 1r**: configura el tiempo de subida (rampa) de la rampa/mantenimiento 1 (hh.mm).
- **FN 1S**: configura el tiempo de mantenimiento de la rampa/mantenimiento 1 (hh.mm).

Este paso es necesario repetirlo para cada una de las 8 rampas/mantenimientos del proceso (SV-1 a SV-8).

Es necesario seleccionar el patrón de programa (PTn), situado en el 2º bloque de parámetros del controlador. Si se configura con un valor de 1, el patrón seleccionado permitirá la ejecución de 4 rampas/mantenimientos (de SV-1 a SV-4). Si su valor es 2, el patrón seleccionado permitirá la ejecución de 4 rampas/mantenimientos (de SV-5 a SV-8). Si su valor es 3, el patrón seleccionado permitirá la ejecución de 8 rampas/mantenimientos (de SV-1 a SV-8).

Para poner en funcionamiento el programador se debe acceder al 1º bloque de parámetros del controlador seleccionando el parámetro **PROG**. A continuación se debe dar el valor RUN para ponerlo en marcha. Para parar el programador se debe asignar el valor OFF.

- Algoritmos de control

El regulador presenta tres posibles algoritmos de control:

- Control ON/OFF.
- Control PID.
- Control Fuzzy.

a) Control ON/OFF:

La salida es ON (100%) u OFF (0%). Es utilizado únicamente para alcanzar valores de temperatura de consigna individuales. Con las teclas de subir y bajar se puede seleccionar la temperatura de consigna deseada (SV). A continuación se enciende el piloto verde C1 para indicar que el horno está calentando.

El parámetro **P** (banda proporcional) presente en el 2º bloque de parámetros del regulador debe configurarse con un valor de 0 para seleccionar este modo de control. Para evitar las vibraciones en este modo se puede configurar el parámetro **HYS** (histéresis) disponible en el 2º bloque de parámetros del regulador.

b) Control PID:

En este control la señal de salida cambia dentro del rango de 0 a 100% de acuerdo con el cálculo PID que determina el proporcional de ON y OFF en cada ciclo de trabajo. Si se ejecuta la función de auto-tuning (AT) se calcula un PID óptimo automáticamente introduciéndose los parámetros de control (P, I y D) en la memoria. También es posible introducir los parámetros del PID manualmente. Si se introducen manualmente se deben establecer los valores de los parámetros de control: banda proporcional P (P), tiempo integral I (I) y tiempo de acción derivativa D (d), presentes en el 2º bloque de parámetros del regulador.

Para activar el auto-tuning se debe establecer el valor 1 en el parámetro AT (AT) del 1º bloque de parámetros.

Cuando finalice el auto-tuning el indicador de punto dejará de parpadear y el parámetro AT se ajustará automáticamente a 0.

El parámetro PID calculado por el auto-tuning se conserva incluso si se desconecta la alimentación.

c) Control Fuzzy:

El funcionamiento de lógica difusa (Fuzzi) se añade al PID generando un control con menos sobremodulación. Se usa en sistemas altamente complejos o no lineales.

Como método de control de temperatura más adecuado se utilizó el algoritmo de control PID asociado a la función de auto-tuning, con objeto de obtener una respuesta óptima de la regulación de la temperatura.

La función auto-tuning calcula automáticamente los parámetros del controlador PID optimizados para un valor fijo de temperatura.

Se realizó un estudio de cómo variaban los valores que devuelve el auto-tuning para distintos intervalos de temperatura. Resultó que los parámetros son más sensibles al rango de temperatura que al valor absoluto de estas temperaturas.

2.6.3.3. Criterio de funcionamiento del horno.

Se realizaron pruebas de funcionamiento y ajuste de los parámetros del horno. Debemos de tener en cuenta la inercia térmica propia del horno, es decir, la cantidad de calor que puede conservar el horno en su interior y la velocidad con que la cede al entorno. Desde que se le entrega potencia eléctrica al horno hasta que esta potencia es transmitida en calor en el interior del mismo transcurre un cierto tiempo.

Para realizar el ajuste del horno se desarrolló una aplicación en la plataforma LabView que permitiese medir simultáneamente la temperatura interna del horno y la temperatura proporcionada por el termopar en contacto con el DUT.

Diferencias entre 5-20°C fueron observadas entre ambas temperaturas, que dependían del rango de temperatura y la velocidad de calentamiento.

De este modo se procedió a efectuar una caracterización del comportamiento dinámico del horno. Se estableció un criterio de medida basado en rangos de

temperatura. Como queremos medir en el intervalo de 0-700°C se establece un criterio de medida que fija 3 rangos de temperatura para este intervalo y así se ejecutan tres programas (uno por rango) de 8 rampas/mantenimientos. Tabla 2.16 muestra los valores de temperatura de consigna para cada rampa/mantenimiento en función del rango (programa). La temperatura de consigna se fija en pasos de 25°C, con un tiempo de subida de 20 minutos y un tiempo de mantenimiento de 5 minutos.

	SV-1	SV-2	SV-3	SV-4	SV-5	SV-6	SV-7	SV-8
Rango I	90°C	115°C	140°C	165°C	190°C	215°C	240°C	265°C
Rango II	290°C	315°C	340°C	365°C	390°C	415°C	440°C	465°C
Rango III	490°C	515°C	540°C	565°C	590°C	615°C	640°C	665°C

Tabla 2.16. Valores de temperatura de consigna SV-1 a SV-8 para cada rango de temperatura.

Se realizaron varias pruebas y se decidió fijar unos parámetros del PID iguales para los tres rangos de temperatura. Los parámetros del PID fueron calculados previamente por el auto-tuning. Para un incremento de 25°C desde la temperatura inicial hasta la temperatura de consigna de cada rampa/mantenimiento, un tiempo de subida de 20 minutos (velocidad de calentamiento de 1,25°C/min) y un tiempo de mantenimiento de 5 minutos, los mejores parámetros del PID son estos valores: $P = 1,8$, $I = 190$ y $D = 45$. Todos estos valores deben ser introducidos manualmente en el control del horno.

La figura 2.100 muestra las temperaturas medidas en los termopares del horno (negro) y del porta-muestras (rojo) bajo el patrón de programación de 8 rampas/mantenimientos para los tres rangos de temperatura prefijados. La ventana incluida en el gráfico muestra las dos primeras temperaturas de mantenimiento ($T=90^{\circ}\text{C}$ y $T=115^{\circ}\text{C}$) correspondientes al rango I. Se puede apreciar que los parámetros elegidos para el PID son adecuados para alcanzar la condición de estabilidad térmica en los niveles de mantenimiento de temperatura. También se puede apreciar la diferencia que hay entre la temperatura del horno y la del DUT. Para una temperatura de mantenimiento de 90°C, la temperatura del termopar del horno es de 101°C y la del DUT es de 108°C. Para una temperatura de mantenimiento de 115°C, la temperatura del termopar del horno es de 118°C y la del DUT es de 124°C.

En particular, para las medidas de caracterización eléctrica con temperatura lo importante es la temperatura del DUT, ya que, es la que se toma como referencia para establecer el criterio de estabilidad térmica.

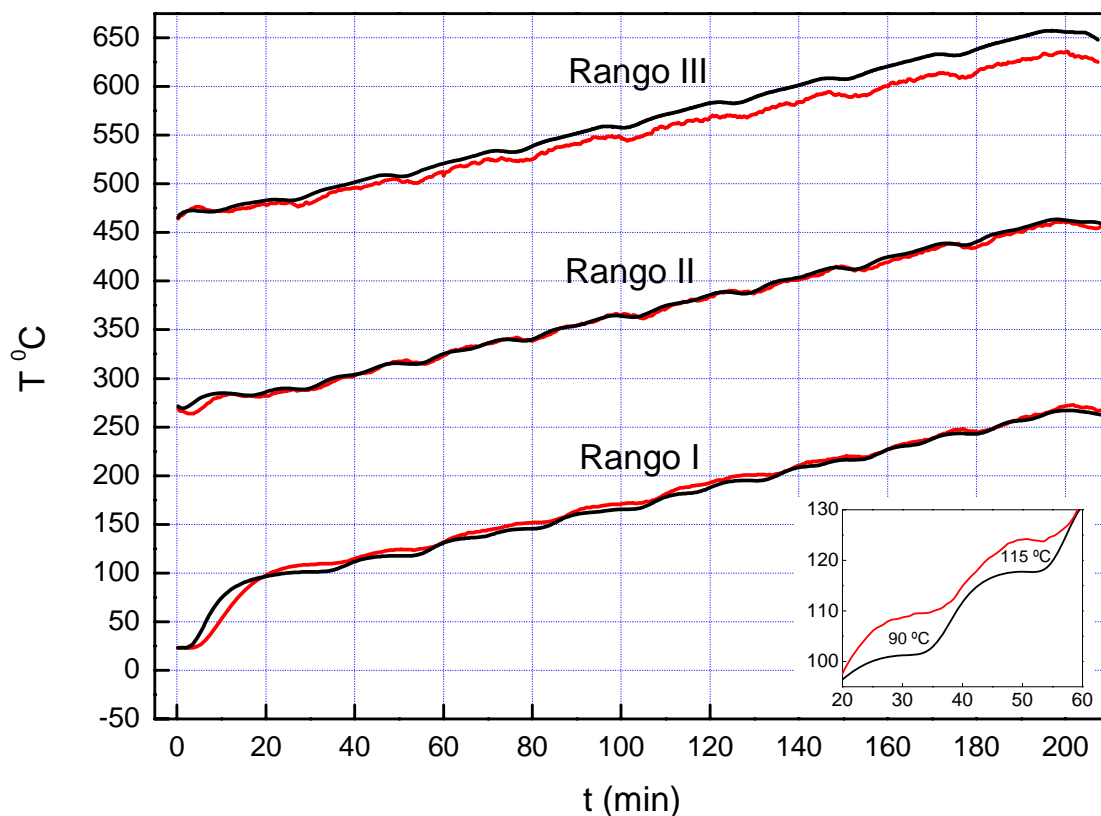


Figura 2.100. Medidas de temperatura del termopar interno del horno y el porta-muestras con 8 rampas/mantenimientos para tres rangos.

Se pueden ejecutar los tres rangos de manera consecutiva, introduciendo cada vez las nuevas temperaturas de consigna del programador antes de lanzar la programación del siguiente rango.

Si se va a ejecutar el rango II o el rango III de manera independiente es necesario estabilizar el horno 25 $^{\circ}\text{C}$ antes de la temperatura inicial de consigna del rango, puesto que para ese intervalo están calculados los parámetros del PID. Si por ejemplo, no se tiene en cuenta este requerimiento y se ejecuta el rango II, el horno alcanzaría una temperatura 50 $^{\circ}\text{C}$ por encima de la temperatura inicial del rango, con lo que los tiempos de la ejecución del rango se incrementarían considerablemente al tener que esperar a que el horno disipase ese calor.

2.6.3.4. Aplicación en LabView.

La aplicación *Temp discrim*, desarrollada en la plataforma LabView, se basa en la medida de tres valores consecutivos de temperatura (T_1 , T_2 y T_3) medidos en el termopar en contacto con el DUT. Si estos tres valores de temperatura cumplen una determinada condición de estabilidad fijada por el usuario (estabilidad de temperatura) entonces se excita el DUT.

Se desarrolló la aplicación debido a no disponer de retroalimentación en el control de potencia del horno una vez definidas las 8 rampas/mantenimientos programables del horno.

Nuestro criterio de estabilidad de temperatura son los valores:

- $\Delta T1 = T2 - T1$.
- $\Delta T2 = T3 - T2$.
- $\Delta T2/\Delta T1 = (T3 - T2)/(T2 - T1)$.

El programa también permite excitar el DUT en modo manual sin necesidad de que se cumpla ninguna condición.

Esta automatización de la medida de temperatura es requerida cuando se necesita realizar la característica I-V del DUT a valores de temperatura estables, sin necesidad de la asistencia del usuario. Esto permite disponer de varias características I-V del DUT para distintas temperaturas.

En la zona de subida de temperatura, la aplicación permite medir los valores de resistencia (R) con la temperatura en el DUT.

El instrumento que realiza la excitación y medida del DUT es el Keithley 2410, por lo que esta aplicación queda englobada dentro del programa que implementa el funcionamiento de este instrumento y será descrita con detalle en el apartado 4.1.5.2 de esta memoria.

Para comprobar el funcionamiento correcto de esta aplicación se realizó la caracterización eléctrica de una muestra (DUT) de óxido cerámico (monocristal de MgO:Li oxidado a $T=1650\text{K}$). Estos monocristales, debido a la presencia del defecto de hueco atrapado ($[\text{Li}]^0$), presentan propiedades semiconductoras en un rango de temperaturas moderadas (25°C - 575°C).

Los valores fijados en el criterio de estabilidad térmica del DUT fueron:

- $\Delta T1 = 0,2$
- $\Delta T2 = 0,2$
- $\Delta T2/\Delta T1 = 0,4$

Estos valores pueden ser tan restrictivos como se quiera. Se trata de buscar un equilibrio, que permita realizar la característica I-V del DUT en un valor de temperatura constante.

Cuando en el rango de temperaturas se cumple el criterio de estabilidad térmica, el DUT es excitado, obteniéndose sus características I-V a valores de temperatura estables. La figura 2.101 muestra la característica V-I del DUT para valores de temperatura de 95°C , 104°C y 122°C . El DUT es excitado con valores de voltaje comprendidos en el rango de -100V a 100V . Puede apreciarse el comportamiento no óhmico del DUT.

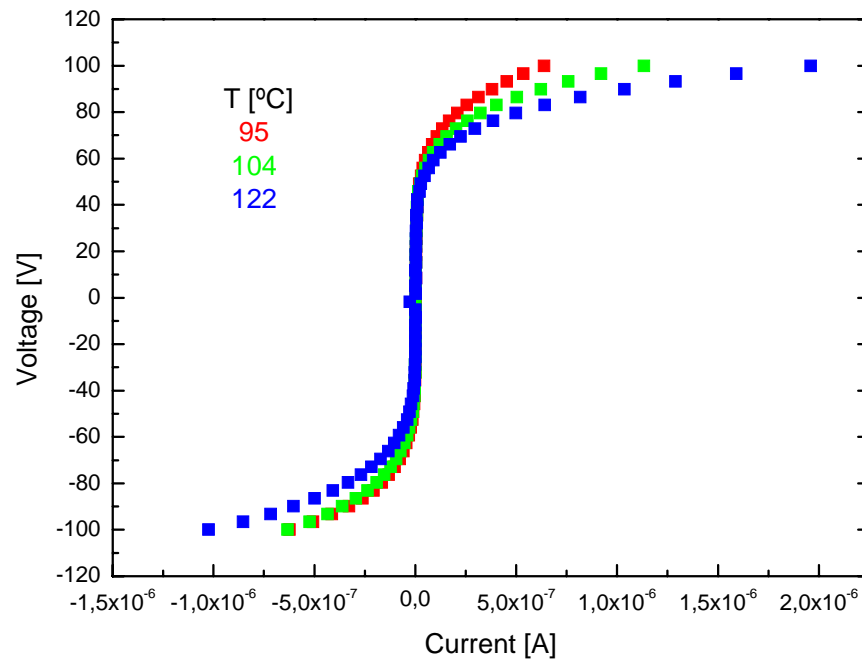


Figura 2.101. Característica V-I del DUT para temperaturas de 95°C, 104°C y 122°C.

Cuando el DUT se calienta (aumenta la temperatura) conduce más, por lo que pasa a ser excitado con valores de voltaje más bajos, comprendidos en el rango de -60V a 60V. La figura 2.102 muestra la característica V-I del DUT para valores de temperatura de 160°C, 187°C y 210°C.

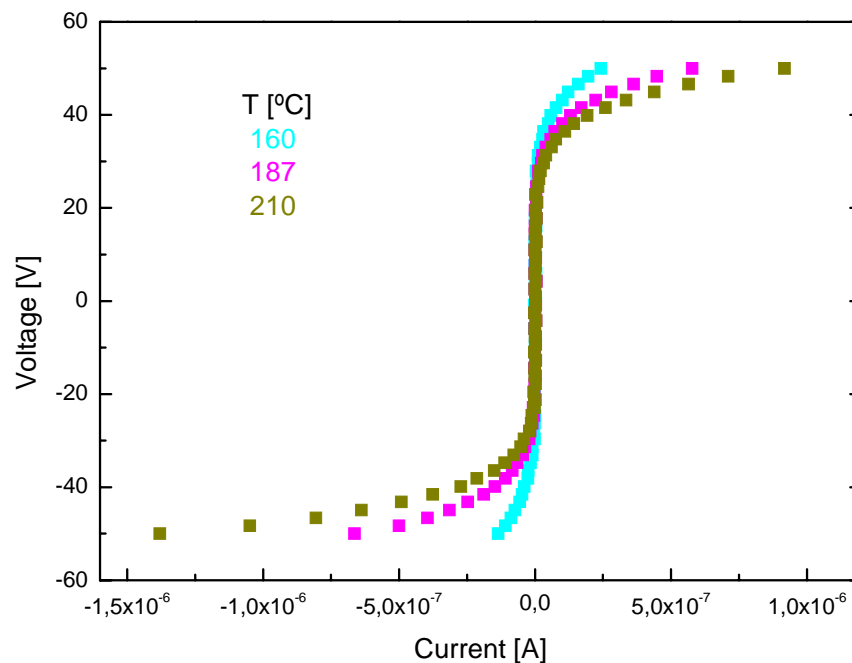


Figura 2.102. Característica V-I del DUT para temperaturas de 160°C, 187°C y 210°C.

Durante todo el rango de temperatura, a excepción de los momentos en los que se realiza la característica I-V del DUT, la aplicación mide los valores de resistencia (R) del DUT para cada temperatura. En la figura 2.103 se muestra la dependencia con la temperatura de la resistencia para una muestra de MgO:Li oxidada que tiene una concentración de defecto de hueco atrapado $[Li]^0$ del orden de $2,2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Se observa que el proceso de conducción está activado térmicamente con una energía de activación de 0,7 eV, como se reporta en la literatura, en el rango de temperatura entre 45-230°C.

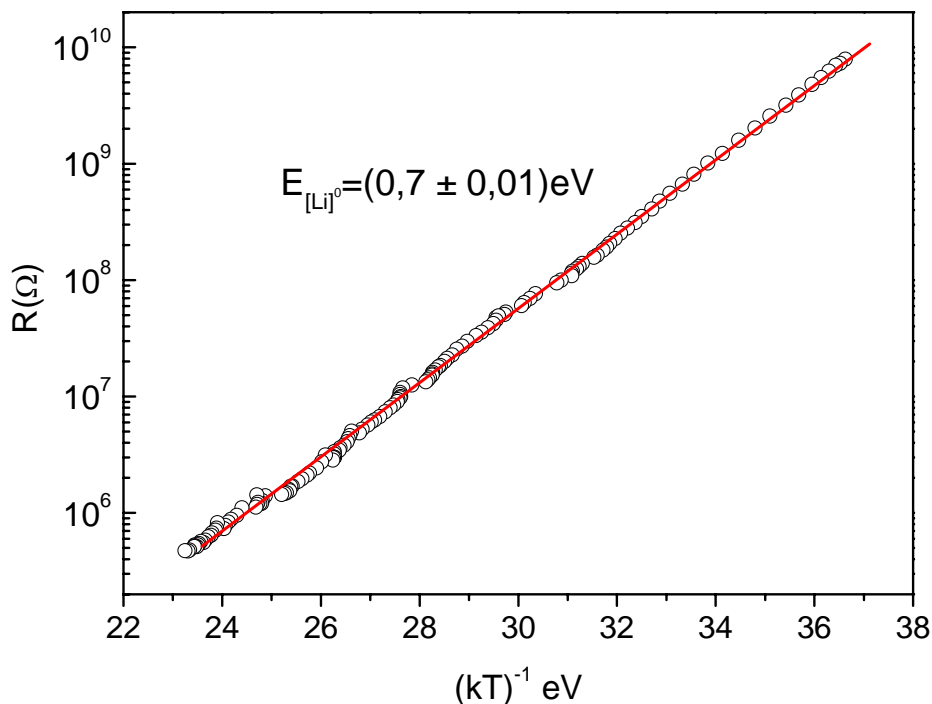


Figura 2.103. Dependencia de la resistencia con la temperatura para una muestra de MgO:Li oxidada.



3. PLATAFORMA LABVIEW

3. PLATAFORMA LABVIEW.

3.1. Principios.

Para la implementación de los programas que automatizan el control de los distintos instrumentos de medida de precisión se ha utilizado el software LabVIEW 8 de National Instruments (NI). LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un entorno de programación gráfica comúnmente extendido entre ingenieros e investigadores para desarrollar sistemas sofisticados de medida, pruebas y control basado en el uso de íconos gráficos intuitivos y cables de programación que parecen un diagrama de flujo. Es por tanto, muy útil en aplicaciones que involucren adquisición, control, análisis y presentación de datos. Además, LabVIEW permite una magnífica integración con nuestros instrumentos de medida y posee un amplio conjunto de bibliotecas integradas para análisis avanzado y visualización de datos, posibilitando el desarrollo de nuevos instrumentos virtuales.

Las características más destacables que hacen que la plataforma de programación LabVIEW sea idónea para el desarrollo de nuestras aplicaciones son:

- Ser un lenguaje intuitivo y de gran flexibilidad, lo que hace se reduzca el tiempo de desarrollo de las aplicaciones al permitir cambios y actualizaciones tanto del hardware como el software.
- Permitir el desarrollo de aplicaciones con gran portabilidad pudiéndose ejecutar en cualquier ordenador.
- Gestionar eficientemente los recursos del sistema al emplear un compilador de tipo paralelo.
- Tener un alto grado de integrabilidad debido a la elevada compatibilidad con las interfaces DAQ y GPIB.

Los programas desarrollados en el entorno de programación LabVIEW se denominan *Instrumentos virtuales* (a partir de ahora llamados *VI*s), porque su apariencia y funcionamiento imitan los de un instrumento real. Sin embargo, son análogos a las funciones creadas con los lenguajes de programación convencionales. Los *VI*s tienen una parte interactiva con el usuario y otra parte de código fuente, y aceptan parámetros procedentes de otros *VI*s. Frente a la utilización de un instrumento tradicional, un instrumento virtual permite una mayor funcionalidad, elevada conectividad y un amplio margen de utilización definido por el propio usuario.

Todos los *VI*s tienen un *panel frontal* y un *diagrama de bloques*. Las paletas contienen las opciones que se emplean para crear y modificar los *VI*s. Presentamos brevemente una descripción de estos conceptos.

3.1.1. Panel frontal.

Se trata de la interfaz gráfica del *VI* con el usuario (véase la figura 3.1). Esta interfaz recoge las entradas procedentes del usuario y representa las salidas proporcionadas por el programa. Un *panel frontal* está formado por una serie de

botones, pulsadores, potenciómetros, gráficos, etc. Cada uno de ellos puede estar definido como un *control* o un *indicador*. Los primeros sirven para introducir parámetros al VI, mientras que los indicadores se emplean para mostrar los resultados producidos, ya sean datos adquiridos o resultados de alguna operación.

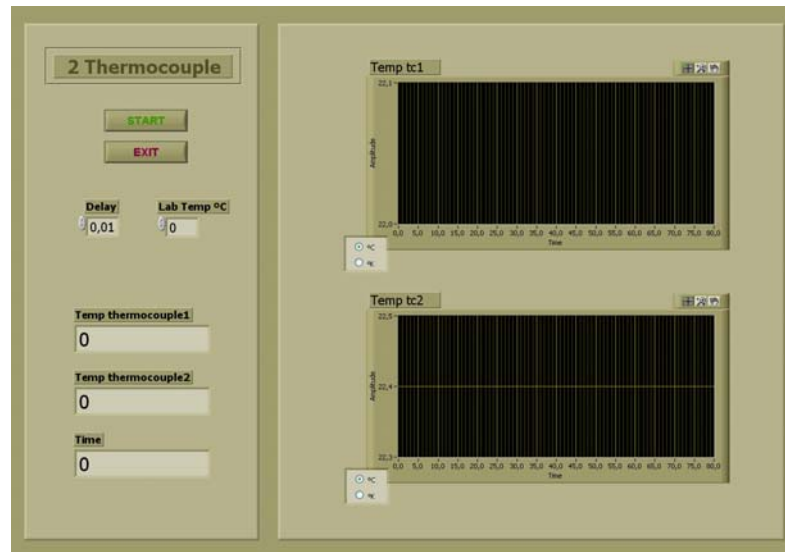


Figura 3.1. Ejemplo de panel frontal en LabView.

3.1.2. Diagrama de bloques.

El *diagrama de bloques* constituye el código fuente del VI (véase la figura 3.2). En el diagrama de bloques es donde se realiza la implementación del programa del VI para controlar o realizar cualquier procesamiento de las entradas y salidas que se crearon en el panel frontal. El diagrama de bloques incluye *funciones* y *estructuras* integradas en las librerías que incorpora LabVIEW. Las funciones y las estructuras son nodos elementales. Son análogas a los operadores o librerías de funciones de los lenguajes convencionales. Los controles e indicadores que se colocan en el Panel Frontal, se materializan en el diagrama de bloques mediante los *terminales*.

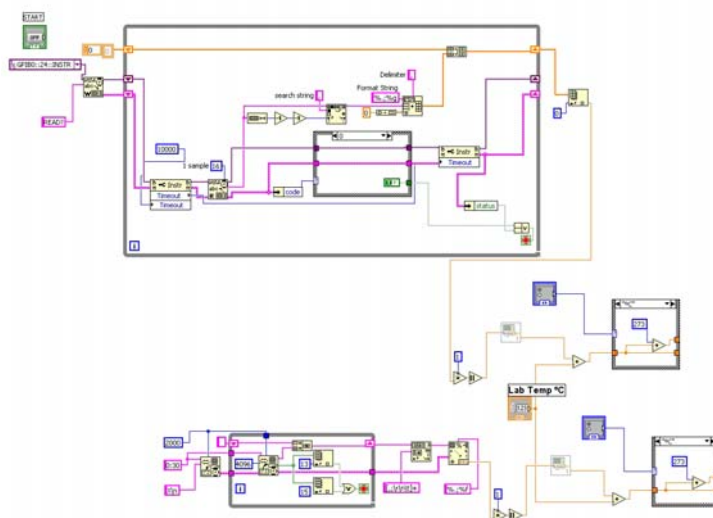


Figura 3.2. Ejemplo de diagrama de bloques en LabView.

El diagrama de bloques se construye conectando los distintos objetos (funciones, estructuras, etc.) entre sí, como si de un circuito se tratara. Los cables unen terminales de entrada y salida con los objetos correspondientes, y por ellos fluyen los datos.

LabVIEW posee una extensa biblioteca de funciones, entre ellas, aritméticas, comparaciones, conversiones, funciones de entrada/salida, de análisis, entre otras.

Las estructuras, similares a las declaraciones causales y a los bucles en lenguajes convencionales, ejecutan el código que contienen de forma condicional o repetitiva (bucle *for*, *while*, *case*, etc.).

Los cables son las trayectorias que siguen los datos desde su origen hasta su destino, ya sea una función, una estructura, un terminal, etc. Cada cable tiene un color o un estilo diferente, lo que diferencia unos tipos de datos de otros.

3.1.3. Paletas.

Las *paletas* de LabVIEW contienen las herramientas, controles y funciones que se requieren para crear y modificar tanto el panel frontal como el diagrama de bloques.

3.1.3.1. Paleta de herramientas (*Tools palette*).

La paleta de herramientas se emplea tanto en el panel frontal como en el diagrama de bloques. Contiene las herramientas necesarias para editar y depurar los objetos tanto del panel frontal como del diagrama de bloques (véase la figura 3.3).

Se llama herramienta a un modo especial de operación del puntero del ratón. El cursor toma el aspecto del icono de la herramienta seleccionada en la paleta. Al habilitarse la selección automática de herramienta, cuando se mueve el cursor sobre los diferentes objetos en el panel frontal o diagrama de bloques, LabView selecciona automáticamente la herramienta correspondiente de la paleta. Cada icono de la paleta cambia el comportamiento del cursor en LabVIEW, con lo que se puede posicionar, operar y editar las diferentes tareas de los VIs.

Con la ayuda la Labview se pueden determinar el uso de cada herramienta de manera rápida.



Figura 3.3. Paleta de herramientas.

3.1.3.2. Paleta de controles (*Controls palette*).

Se utiliza únicamente en el panel frontal. Contiene todos los controles e indicadores que se emplearán para crear la interfaz del VI con el usuario. Cada icono representa una subpaleta, la cual contiene controles para colocar en el panel frontal (véase la figura 3.4). Un control es un objeto que utiliza el usuario para interactuar con

los VIs, introduciendo datos o controlando el proceso. Ejemplos de controles son los botones, controles deslizantes, diales, cuadros de texto, etc.

De igual modo, un indicador es un objeto del panel frontal que muestra datos al usuario. Por ejemplo: gráficas, termómetros, medidores analógicos y digitales, etc.

Cuando colocamos un control o indicador en el panel frontal, automáticamente aparece un terminal en el diagrama de bloques. Al seleccionar objetos desde el menú *Controls* estos aparecen sobre el panel frontal y pueden colocarse donde convenga, disponiendo su propio menú desplegable que permite la configuración de algunos parámetros específicos de cada tipo de control.

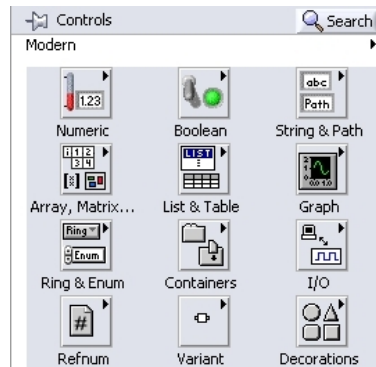


Figura 3.4. Paleta de controles.

3.1.3.3. Paleta de de funciones (*Functions palette*).

Se emplea en el diseño del diagrama de bloques. La *paleta de funciones* (véase la figura 3.5) contiene todos los objetos que se emplean en la implementación del programa del VI, ya sean funciones aritméticas, de entrada/salida de señales, entrada/salida de datos a fichero, adquisición de señales, temporización de la ejecución del programa, etc.

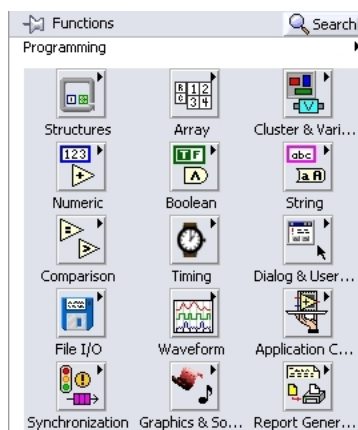


Figura 3.5. Paleta de funciones.

De este modo, construimos nuestros diagramas de bloques mediante los terminales generados en el panel de control por los controles e indicadores, y los VIs, funciones y estructuras de la paleta de funciones. Cada icono de la paleta representa una subpaleta, la cual contiene VIs y funciones para colocar en el diagrama de bloques.

Las estructuras, VIs y funciones (llamados en conjunto nodos) de la paleta de funciones proporcionan la funcionalidad al VI. Cuando se añaden nodos a un diagrama de bloques, se pueden conectar entre sí y a los terminales generados por los controles e indicadores del panel de control. Al final, un diagrama de bloques completo se asemeja a un diagrama de flujo.

3.2. Programación modular.

La programación en el entorno gráfico LabView comienza en el panel frontal. En primer lugar se definen y seleccionan de la paleta de controles todos los controles (entradas de usuario) e indicadores (salidas de pantalla del VI) que serán utilizados para introducir los datos por parte del usuario y presentar en pantalla los resultados. Una vez colocados en la ventana del panel frontal todos los objetos necesarios, pasamos al diagrama de bloques, que es donde se realiza la programación propiamente dicha. En la ventana del diagrama de bloques se encuentran los terminales correspondientes a los objetos situados en el panel frontal, dispuestos automáticamente por LabView.

Posteriormente, se cargan las funciones, estructuras, etc. requeridas para el desarrollo del programa, las cuales se unen a los terminales mediante cables. Al desplegar la paleta de funciones, éstas aparecen ordenadas por tipos. Por ejemplo, en el grupo Structures (estructuras), nos encontramos con las sentencias de repetición while y for, las sentencias de secuenciación, las de selección, etc., que, como ocurre en otros lenguajes de programación, son las más utilizadas en nuestras aplicaciones.

En LabView, como en muchos otros lenguajes de programación, el concepto de programación se basa en la programación modular. La función es la base de la programación modular, por lo que, la programación modular se basa en la programación con funciones. Muchas de estas funciones son proporcionadas por el propio fabricante de software y se presentan ordenadas por tipos en las librerías de funciones. Estas librerías pueden ser vistas dentro de la paleta de funciones, mostrándose en el listado de las librerías de funciones. Otras funciones son proporcionadas directamente por el fabricante de hardware, que presenta controladores de sus propios instrumentos para la plataforma LabView. Estos controladores quedan instalados en la paleta de funciones dentro de un mismo directorio, apareciendo tanto funciones básicas como aplicaciones de nuestros instrumentos.

3.2.1. Niveles funcionales.

Los drivers o controladores permiten desarrollar aplicaciones más rápidamente, puesto que no es necesario aprender protocolos complejos, permitiendo una programación más sencilla (véase la figura 3.6). A este tipo de programación se le conoce como de *alto nivel*.



Figura 3.6. Icono de un controlador en el diagrama de bloques.

En realidad, hay dos tipos diferentes de controladores de instrumentos que pueden ser utilizados en función de nuestras necesidades: controladores *Plug & Play* y controladores *IVI* (véase la figura 3.7).

Un controlador de instrumentos *Plug & Play* no es más que un conjunto de VIs utilizados para controlar un instrumento. Cada VI corresponde a una operación de programación como por ejemplo configurar y disparar el instrumento, leer desde él y escribir en él. De este modo, se simplifica el control y la comunicación con el instrumento.

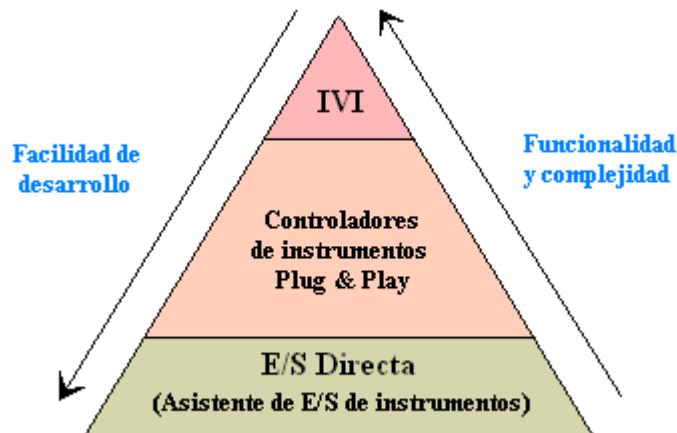


Figura 3.7. Niveles funcionales de comunicación.

Los controladores de instrumentos virtuales intercambiables (IVI) son controladores de instrumentos más sofisticados, y presentan mayor rendimiento y flexibilidad. Son utilizados para aplicaciones de prueba más complejas que requieran capacidad de intercambio, cacheo de estados o simulación de instrumentos. El rendimiento aumenta al integrar un mecanismo de registro de estado que sólo envía al instrumento los comandos necesarios para cambiar su estado. Son utilizados en intercambio y simulación de aplicaciones de prueba. Los controladores IVI constituyen una herramienta robusta.

En nuestro proyecto, y con el fin de no estar ligado a una tecnología cerrada de controladores y poder establecer de modo sencillo la interacción con los instrumentos, se pasó a desarrollar directamente controladores específicos para todos los instrumentos (VIs). Se programó en este nivel funcional intermedio que permitía una facilidad de desarrollo en consonancia con la funcionalidad exigida por nuestros programas.

El nivel de desarrollo más sencillo se encuentra la comunicación entrada/salida (E/S) directa a través de un asistente de E/S (véase la figura 3.8). Cuando el nivel alcanzado no permite desarrollar controladores específicos para un instrumento concreto o si habiendo controlador proporcionado por el fabricante, éste no satisface plenamente la integración en nuestra aplicación, es posible utilizar el asistente de E/S de instrumentos. Este asistente fue útil en las primeras comunicaciones con los instrumentos, para posteriormente pasar a un nivel superior de complejidad y funcionalidad y poder desarrollar todos los programas con controladores de instrumentos específicos propios, como los desarrollados en este proyecto.



Figura 3.8. Icono funcional del asistente de E/S en el diagrama de bloques.

El asistente de E/S de instrumentos proporciona una interfaz de usuario para escribir interactivamente comandos a un dispositivo, leer datos que envía el dispositivo y especificar cómo realizar un análisis sintáctico de la respuesta para convertirla en un formato relevante para la aplicación. Este asistente configura automáticamente código para las configuraciones de su entorno. La ventaja de utilizar el asistente de E/S es poder realizar un análisis de las respuestas complejas de un instrumento, que posteriormente pueden ser utilizadas en los controladores del instrumento y que permite ahorrar tiempo en la creación de las aplicaciones.

Debido a que los controladores de instrumento suministrados por los fabricantes no cumplen en la mayoría de los casos la totalidad de los requisitos de nuestra aplicación y que en ocasiones los instrumentos no disponen ni tan siquiera de controladores desarrollados para LabView, se decidió realizar una programación de bajo nivel en el desarrollo de nuestros programas, integrándola en una programación de alto nivel mediante el uso de los subVIs que se repetían o eran comunes en varias aplicaciones y que previamente fueron desarrollados en bajo nivel.

La programación de *bajo nivel* en LabView se basa en el envío de comandos básicos de programación al instrumento, que permiten por ejemplo, elegir las funciones de medida, volcado de los datos, etc. Para realizar la comunicación con el instrumento se usaron las funciones genéricas VISA, que permiten enviar cadenas de caracteres a un instrumento. Para enviar los comandos a los instrumentos se usaron funciones de la librería VISA principalmente y funciones de la librería GPIB-488.2. Un ejemplo se puede ver en la figura 3.9, donde la cadena caracteres (comandos) en la línea *write buffer* se escribirá en el dispositivo asignado en la línea *Visa resource name*.



Figura 3.9. Función de escritura bajo VISA.

Debemos conocer los comandos de instrumento que activan las distintas funciones y modifican las configuraciones del instrumento para poder programar cualquier función sobre él.

Cada programador tiene la capacidad de generar por sí solo las funciones que son necesarias para el desarrollo de las aplicaciones. Cuando una misma tarea es requerida en varios puntos de la aplicación, en lugar de construir esa porción del código de forma repetitiva, la solución aportada en nuestros programas es la de desarrollarla como un subVI (sub-instrumento virtual) y llamarla en todos los puntos de la aplicación que sea necesaria. Esto permite que mejoras o modificaciones adoptadas en el subVI sean realizadas una única vez y se ejecuten en todas las llamadas al subVI, pudiendo ser utilizado en el desarrollo de otras aplicaciones. El subVI posibilita que los fragmentos de código sean asociados por funcionalidad dentro del diagrama de bloques.

El subVI queda representado por un icono en el del diagrama de bloques de la aplicación y es guardado en memoria con un nombre que presenta la misma extensión de archivo que un VI genérico (.vi). Se introduce en otras aplicaciones haciendo la llamada a este archivo a través de la paleta de funciones (*Select a VI*). Los subVIs utilizados en nuestro proyecto serán descritos con más detalle en el apartado 3.7.

Ejecutando View/VI Hierarchy es posible visualizar la jerarquía de llamadas entre SubVIs para todas las aplicaciones desarrolladas y así distinguir entre niveles superiores e inferiores. La jerarquía específica de cada programa será mostrada en el apartado 3.8.

Los VIs y subVI desarrollados en LabView disponen de un esquema de funcionamiento secuencial. Cuando un VI o subVI envía la orden de realización de una medida, éste debe esperar a la respuesta del instrumento. Debido a que los tiempos de espera son largos es necesario utilizar las interrupciones que permiten a los instrumentos notificar al controlador que se ha llegado a un determinado estado. Las interrupciones que pueden generar los instrumentos se llaman peticiones de servicio (*Service Request*) y existe una línea física en el bus dedicada a este propósito (*SRQ*). Mediante la comprobación periódica del valor de esta línea se accede al estado en que se encuentra el instrumento, que es utilizado en la programación.

La sintaxis que deben usar los comandos en la programación viene especificada en la norma *IEEE-488.2*, como ya se explicó con detalle en el apartado 2.1.4. SCPI (Standard Commands for Programmable Instrumentation) adopta la sintaxis de esta norma y define los contenidos a través de una serie de modelos genéricos de instrumento. Estos comandos son los que utilizan la mayoría de los instrumentos para comunicarse de modo remoto. Hay algunos instrumentos que permiten la programación tanto en SCPI como en modo DDC (Device Dependent Command), pero este último modo está menos estandarizado en la actualidad, por lo que nuestras aplicaciones se programan en modo SCPI. Hay una excepción, el instrumento Keithley 182, que únicamente permite el modo DDC para comunicarse en fase remota.

3.3. Estructuras y herramientas más utilizadas.

En la *paleta de funciones* la primera opción es la de las *estructuras*. Éstas controlan el flujo de nuestros programas, bien sea mediante la secuenciación de acciones, ejecución de bucles, etc.

Las estructuras se comportan como cualquier otro nodo en el diagrama de bloques, ejecutando automáticamente lo que está programado en su interior una vez que tiene disponibles los datos de entrada, y suministrando los correspondientes valores a los cables unidos a sus salidas.

Las estructuras y herramientas que más han sido utilizadas en nuestras aplicaciones se describen a continuación.

3.3.1. Case Structure.

La estructura *Case* (véase la figura 3.10) posee varios subdiagramas (al menos dos). Sólo se ejecutará el contenido de uno de ellos, dependiendo del valor conectado al selector, cada vez que la estructura se ejecute. El caso más sencillo utilizado corresponde a un selector de tipo booleano. En este caso, la estructura *Case* tiene dos subdiagramas (*True* y *False*). En nuestras aplicaciones se utiliza también como variable de selección un valor numérico, por lo que el número de subdiagramas puede aumentar para cumplir todas las necesidades de programación.

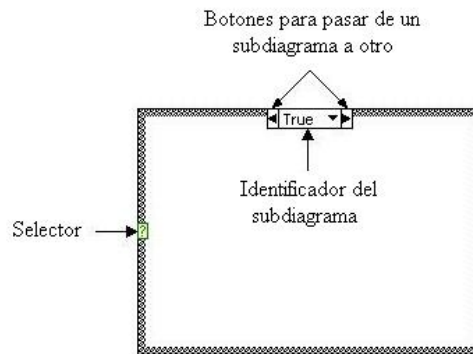


Figura 3.10. Detalle de estructura Case.

3.3.2. Sequence Structure.

La estructura *Sequence* (véase la figura 3.11) presenta varios subdiagramas, aunque únicamente se puede visualizar uno en pantalla. Posee en un parte superior un identificador del subdiagrama mostrado y gracias a las flechas situadas a ambos lados del mismo, podemos ver los demás subdiagramas. Esta estructura permite la ejecución del programa de modo secuencial, ejecutándose primero el subdiagrama de la hoja (frame) nº 0, después la nº 1 y así sucesivamente.

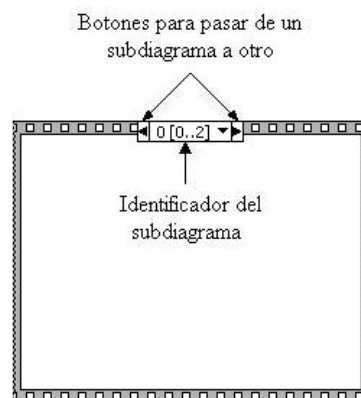


Figura 3.11. Detalle de estructura Sequence.

3.3.3. For Loop.

La estructura *For Loop* es equivalente al bucle *for* en los lenguajes de programación convencionales. Ejecuta el código que está dentro de su estructura un número determinado de veces. En la figura 3.12 se puede apreciar la imagen de esta estructura.

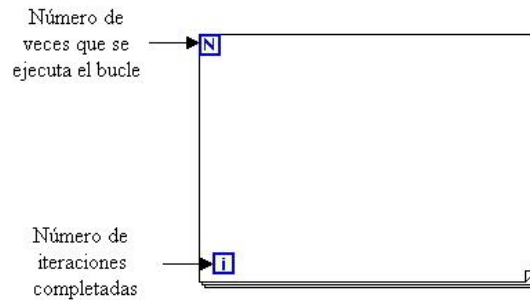


Figura 3.12. Detalle de estructura For Loop.

3.3.4. While Loop.

La estructura *While Loop* es equivalente al bucle *while* empleado en los lenguajes convencionales de programación (véase la figura 3.13). Su funcionamiento es similar al del bucle *for*. El programa comprueba el valor de la variable conectada al terminal condicional al finalizar el bucle. Si se cumple la condición se vuelve a ejecutar lo que hay en el interior del bucle, en caso contrario, termina su ejecución. Por lo tanto, el bucle siempre se ejecuta al menos una vez.



Figura 3.13. Detalle de estructura While Loop.

3.3.5. Formula Node.

La estructura *Formula Node* (véase la figura 3.14) se emplea para introducir en el diagrama de bloques fórmulas de un modo directo. Resultó de gran utilidad al introducir la ecuación que permite calcular la temperatura a partir de la diferencia de potencial mostrada en un termopar, ya que tiene muchas variables de entrada y es relativamente compleja. En esta estructura se deben definir las variables de entradas y salidas que se utilizarán en la fórmula presente en el interior del recuadro.

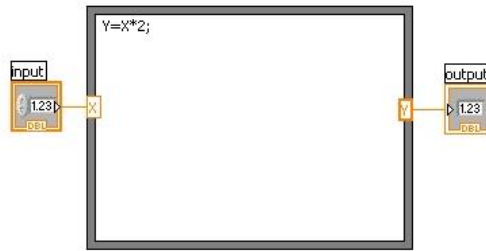


Figura 3.14. Detalle de estructura Formula Node.

3.3.6. Event Structure.

La estructura *Event* resulta muy útil en VIs en los que interactúa el usuario porque mejora la eficiencia del programa. Presenta uno o más subdiagramas que se ejecutan según el usuario interactúa con el VI (véase la figura 3.15). Posee en la parte superior un identificador del subdiagrama mostrado y con las flechas situadas a ambos lados del mismo, podemos ver los demás subdiagramas. Este identificador muestra la condición o evento que hace que el código del subdiagrama se ejecute.

En la esquina superior izquierda tiene un terminal llamado Event Timeout que se usa en el evento por defecto: el Timeout. El código del diagrama para el evento timeout se ejecutará cuando pase el número de milisegundos indicados en el terminal Event Timeout. Cada subdiagrama debe tener asociados uno o varios eventos. Lista de eventos que puede dar lugar a la ejecución del subdiagrama es amplia, aunque la más utilizada en nuestras aplicaciones corresponde al cambio de valor de una determinada variable de control.

En la parte izquierda de cada subdiagrama de la estructura Event se sitúa Event Data Node que aporta información sobre la fuente del evento, por ejemplo, una referencia al control, su valor actual y el anterior al evento, etc.

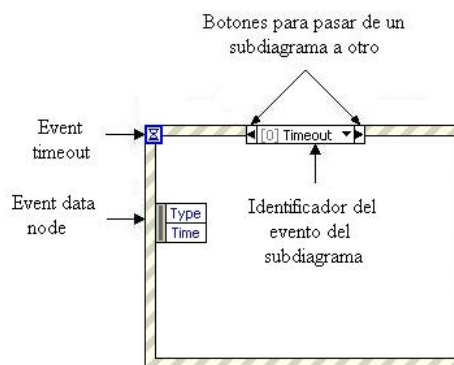


Figura 3.15. Detalle de estructura Event Structure.

3.3.7. Property node.

La herramienta *Property Node* (nodo de propiedad) permite modificar o utilizar las propiedades o atributos de un control o un indicador.

Las propiedades de nodo son utilizadas para adquirir y cambiar la configuración de un VI, objeto o propiedades de aplicación (véase la figura 3.16). Cuando creamos un nodo de propiedad de un control o indicador en el diagrama de bloques tenemos la posibilidad de modificar o acceder (escritura o lectura) a sus propiedades generales. Si la propiedad seleccionada es el campo *Value* es posible leer o cambiar el valor del control o indicador correspondiente. Este campo tiene un funcionamiento similar al de una variable local asociada a un control o indicador.

Las propiedades de nodo asociadas a controles e indicadores más empleadas fueron las siguientes:

- *Value*: permite acceder o modificar su valor.
- *Disable*: permite habilitar, deshabilitar o deshabilitar atenuando en gris la variable.
- *Visible*: permite mostrar o no mostrar la variable en el panel frontal.

La herramienta Property Node posibilita el control del aspecto y estado de un terminal del panel frontal de forma programada, es decir, desde el diagrama de bloques.

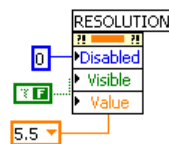


Figura 3.16. Property node de un control.

Todos los programas desarrollados tienen similar estructura de control. Se ha tratado de desarrollar el mismo criterio. Tanto en la programación del diagrama de bloques como en diseño del panel de control de usuario de los distintos programas de implementación de los instrumentos de medidas, se ha llevado a cabo la misma estructura básica, utilizando las mismas estructuras y herramientas.

3.3.8. Radio buttons.

Al diseñar el interfaz de usuario surgió la necesidad de disponer de controles que permitiesen al usuario seleccionar una única opción entre varias posibilidades y que, además, éstas estuvieran siempre visibles con el fin de poder escoger entre todas las opciones disponibles. Se empleó el control booleano *Radio buttons* (botones de opciones), donde sólo un botón puede permanecer en selección en cualquier momento (véase figura 3.17).



Figura 3.17. Control Radio buttons con la opción R seleccionada.

Este elemento presenta una interfaz gráfica de usuario que permite elegir un sólo valor de un conjunto predefinido de opciones. Como es lógico, el número de opciones a elegir es de al menos dos. Junto a cada botón normalmente se muestra una leyenda que describe la opción que este botón representa. Cuando el usuario selecciona un botón, se anula la selección de cualquier botón seleccionado previamente.

3.3.9. Tab control.

Cuando dentro de un mismo programa es necesario desarrollar varias aplicaciones se emplea la herramienta *Tab control* (véase la figura 3.18). Este control se muestra como un conjunto de páginas o fichas. Dentro de cada página se agregan todos los controles e indicadores necesarios para cada aplicación. Por lo tanto, en cada página se diseña la interfaz de usuario de una aplicación concreta. Tendremos tantas páginas como aplicaciones en nuestro programa.



Figura 3.18. Tab control de dos páginas.

Dentro de cada página del Tab control podemos agregar otro u otros Tab Control si son necesarios. En nuestros programas las etiquetas del margen superior no están visibles.

3.4. Diagrama de bloques básico. Diagrama de estados.

En el diseño de los diagramas de comportamiento y sus transiciones (véase la figura 3.19) se desarrolló una estructura básica común a todas las aplicaciones que permite la programación gráfica del flujo de datos.

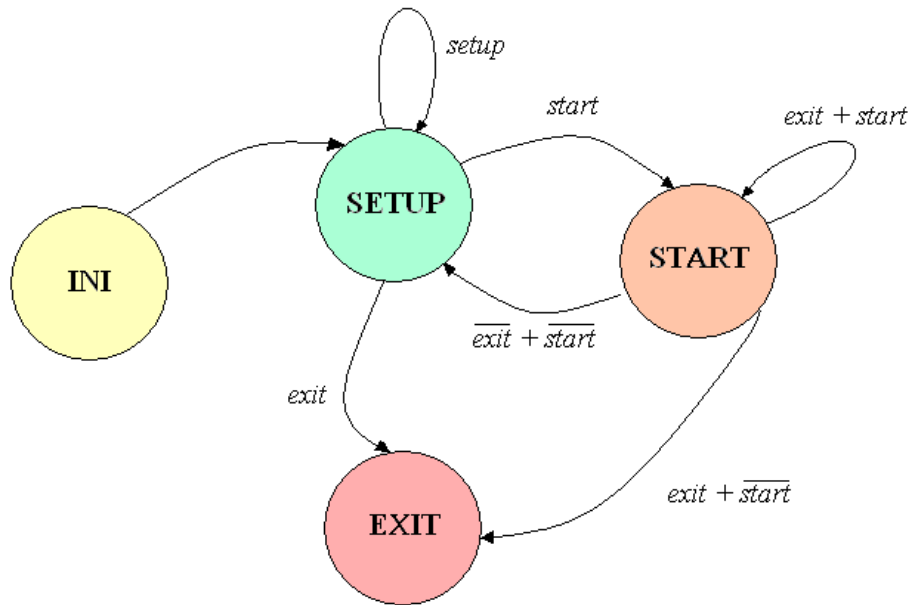


Figura 3.19. Diagrama de estados del sistema básico.

A continuación se describirán estos diagramas de comportamiento y sus transiciones que nos permiten entender de una manera más sencilla la programación del diagrama de flujo de los programas. Debemos definir primero el comportamiento de estado y transición para su posterior empleo en el flujo de datos de LabView.

Con el fin de establecer un diagrama que sirva de base para todas las aplicaciones, se definieron 4 estados genéricos: INI, SETUP, START y EXIT. Estos estados sólo tienen sentido desde el punto de vista de la programación y por lo tanto aparecerán únicamente en el diagrama de bloques y no en el panel de control.

Para pasar de unos estados a otros se necesita que ocurra un evento. Estos eventos vienen definidos por los cambios de valor de los controles: Setup, Start y Exit (véase la figura 3.20). Estos controles, aparecen tanto en el panel de control, diseñado como botones, como en el diagrama de bloques de la aplicación con los terminales.



Figura 3.20. Botones Setup, Start y Exit.

A continuación se describen los distintos estados.

3.4.1. INI.

Este estado define el comportamiento inicial (véase la figura 3.21). Al ejecutarse el programa, es necesaria la inicialización de todas las variables que intervienen. Esta inicialización corresponde tanto a los valores de los controles e indicadores, así como su representación en el panel de control. El uso de la herramienta Property Node permite que todas las variables queden inicializadas correctamente. En el caso de que el programa tenga varias opciones y aplicaciones, también quedarán definidas la opciones de arranque del mismo.

El estado *INI* es el estado de ejecución por defecto una vez que arranca la aplicación (estado inicial).

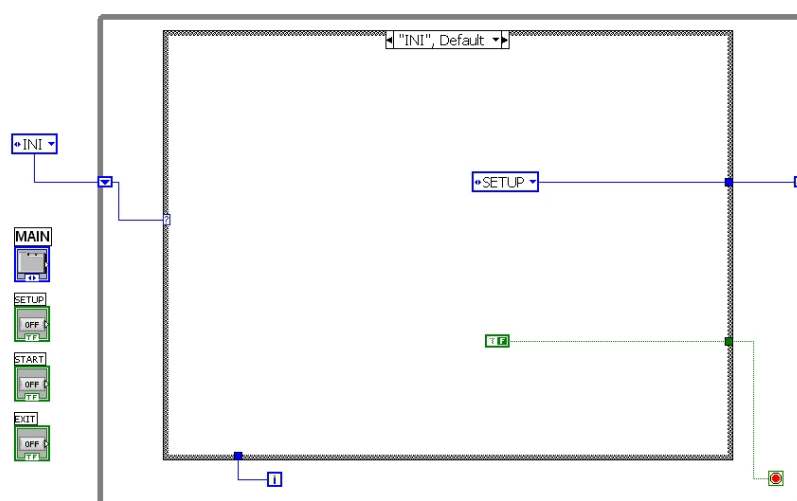


Figura 3.21. Detalle básico de la programación del estado INI.

Al ser un estado de inicialización no necesita ningún evento para pasar a otro estado, pasando directamente al estado *SETUP*, una vez que realiza las acciones requeridas en él.

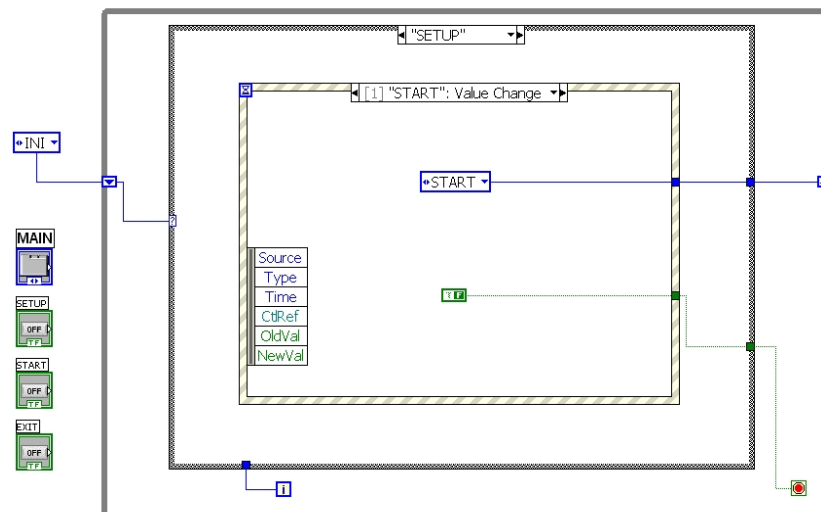
3.4.2. SETUP.

El estado *SETUP* define la inicialización del instrumento de medida empleado en la aplicación (véase la figura 3.22). Antes de realizar cualquier medida, un instrumento de precisión debe ser configurado en función de sus parámetros de inicio y de configuración asociados a una medida específica.

Cuando se enciende un instrumento electrónico éste carga unos valores de configuración por defecto, que cada fabricante previamente ha establecido. El instrumento permite realizar funciones más específicas para lo cual es necesario configurar el instrumento. Por ejemplo, el electrómetro 6517A es capaz de realizar medidas de carga cuando es configurado para tal fin. Los parámetros de configuración requieren determinar la función de la medida, su resolución, utilización de filtros, tiempo de integración, rango de la medida, número de muestras, etc. De esta forma, se dota al sistema de gran flexibilidad.

El evento que produce que el juego de instrucciones, que modifica estos parámetros, sea mandado al instrumento, es la pulsación del control *Setup*.

En el caso de pulsar el botón *Start* se pasa directamente al estado START. La figura 3.23 muestra el diagrama de bloques básico del paso al estado START tras la pulsación del botón Start.



128

Si el botón *Exit* es pulsado se produce el evento que provoca que se pase al estado EXIT. La figura 3.24 muestra el diagrama de bloques básico del paso al estado EXIT tras la pulsación del botón Exit.

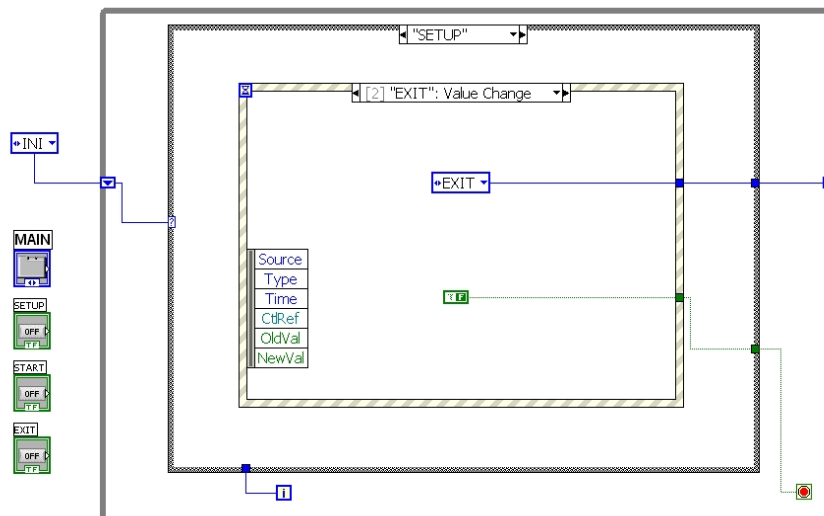


Figura 3.24. Detalle básico del paso del estado SETUP al EXIT.

3.4.3. START.

Este estado representa la toma de medidas propiamente dicha. Después de la configuración en el estado Setup, y tras pulsar el control Start, comienza la ejecución de la captura de datos y volcado de los mismos desde el instrumento de medida a nuestros indicadores presentes en el panel de control. Posteriormente puede darse el procesamiento de los mismos, su almacenamiento o su interpretación para que otras acciones puedan generarse.

En este estado (véase la figura 3.25), los controles e indicadores que no pueden ser modificados durante su ejecución, quedando deshabilitados. Al terminar todo el proceso que debe ser realizado en este estado volverán a estar habilitados.

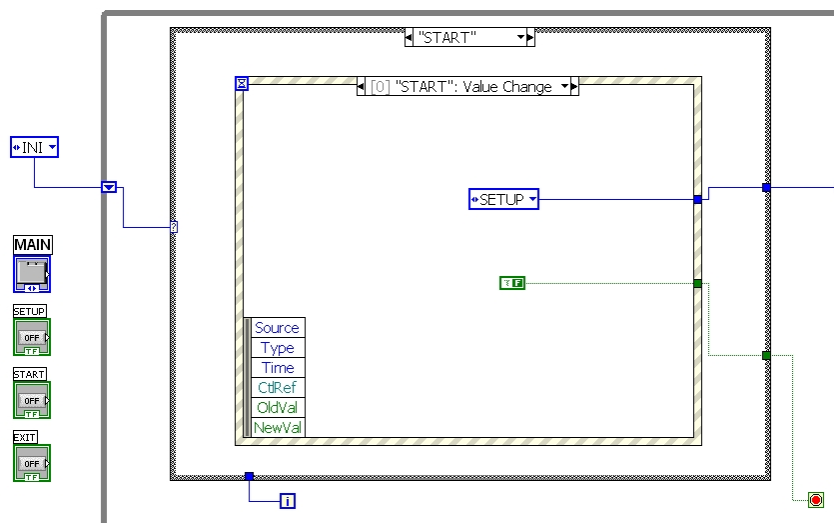


Figura 3.25. Detalle básico del diagrama de bloques de estado START.

Si mientras se está en ejecución dentro de este estado se pulsa el botón del panel de control *Exit*, el programa sale de la ejecución y regresa de nuevo al estado START (véase la figura 3.26), encontrándose en el modo de espera, para poder ser ejecutado de nuevo en cuanto se pulse el botón *Start*. Si el por contrario no se está en ejecución y se pulsa el control *Exit*, se pasará al estado EXIT.

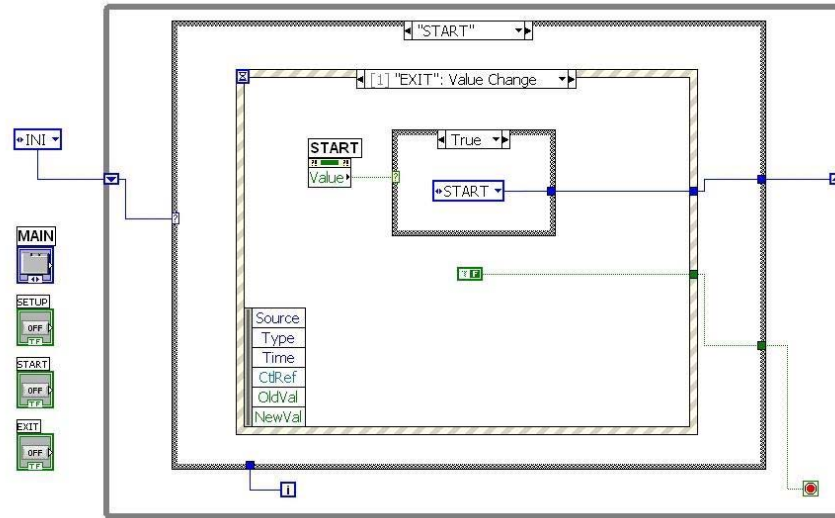


Figura 3.26. Detalle del diagrama de bloques de estado START.

3.4.4. EXIT.

Corresponde al estado final que se alcanza cuando finaliza la secuencia lógica del programa, es decir, cuando ha concluido el volcado de valores de las medidas y/o su procesado. Una vez aquí es necesario liberar los instrumentos. Los instrumentos pasan de estar en modo remoto, controlados por la GPIB, a ser liberados al modo local.

Al ser un estado de salida y finalización, permite que toda la aplicación se dé por concluida y el programa se cierre completamente (véase la figura 3.27).

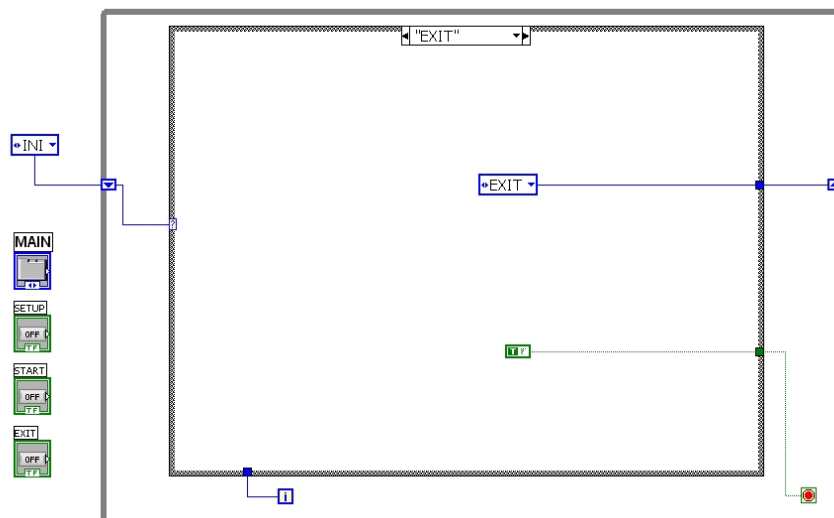


Figura 3.27. Detalle del diagrama de bloques de estado EXIT.

3.5. Programación de instrumentos modulares en LabView.

Todo instrumento de medida de precisión es configurado de fábrica con unos parámetros iniciales de arranque, que por lo general, corresponden con su configuración básica o estado más simple de medida, aunque estos pueden ser configurados para varios modos de funcionamiento.

Primero realizamos la configuración inicial del instrumento adecuada para cada tipo de medida, pasando de la que trae por defecto a la configuración específica de la medida a realizar. Posteriormente se realiza la secuencia de media. Por último tenemos la configuración final del instrumento. De este modo, podemos subdividir en distintas tareas el flujo que deben llevar las instrucciones de código de todo instrumento de medida que se pretenda implementar en LabView. La figura 3.28 muestra el flujograma para la configuración de un instrumento.

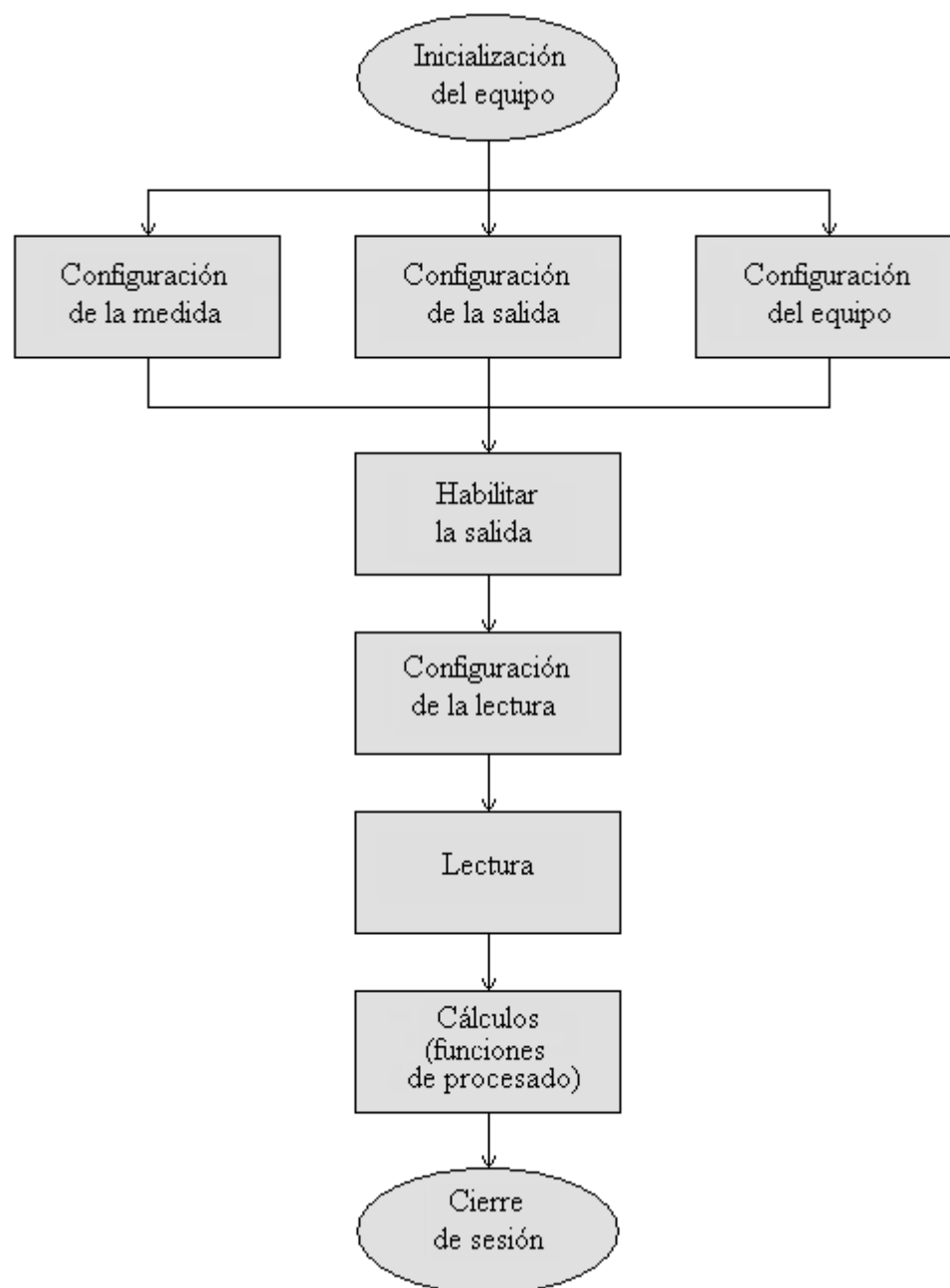


Figura 3.28. Diagrama de flujo para configuración de instrumentos en LabView.

Etapas que se deben seguir para implementar el funcionamiento del instrumento en un VI de LabView:

- Inicialización del instrumento: utilización de Reset, Clear. Se puede realizar la identificación del instrumento, inicialización de la memoria del instrumento, utilidades de sonido, de display, etc., siempre y cuando el instrumento disponga de estas prestaciones con su código correspondiente para modo remoto en GPIB.
- Configuración de la medida: cuando se quiere modificar la elección de la función de medida a realizar, rangos, resolución, media a 2/4 puntas, etc.
- Configuración de la salida: esta etapa sólo es para instrumentos que dispongan de una salida como fuente entre sus características. Es posible definir la función de la salida, su protección, modo de funcionamiento de salida (rampa, cuadrada, etc.) si está disponible.
- Configuración del instrumento: permite modificar filtros, impedancias, funciones matemáticas, utilización de cable de guarda, configuración de límites, puertos de entrada/salida, definir la línea de alimentación.
- Habilitar la salida: para instrumentos que dispongan de fuente de salida, se debe activar o desactivar ésta. En realidad, puede emplearse en cualquier etapa del diagrama de flujo, aunque se desaconseja su utilización antes de que sea necesaria.
- Configuración de la lectura: permite definir la fuente de disparo, retrasos en el disparo, número de medidas.
- Lectura: ejecución del disparo/s y espera de la secuencia de lectura hasta la finalización del ciclo de medida.
- Cálculos: permite usar funciones de procesado de los resultados obtenidos tras el proceso de lectura.
- Cierre sesión: es posible interaccionar con el instrumento en busca de errores en el proceso y posteriormente cerrar la sesión. Posibilidad de ejecutar un Reset, Clear, siempre y cuando se pretenda volver a las condiciones iniciales del instrumento. Cuando la comunicación por el puerto GPIB está establecida, el instrumento se encuentra en modo remoto. Por lo tanto, una vez cerrada la sesión de comunicación de LabView es necesario liberar el instrumento, pasándolo a modo local. Si se pretende mantener la última configuración utilizada es necesario no emplear los comandos Reset, Clear.

El modo en que LabView reconoce sobre qué instrumento es el que está comunicando es mediante direcciones. Cada dispositivo en la interfaz GPIB debe tener una dirección única. La dirección viene configurada de fábrica, aunque es posible modificarla a cualquier valor de un rango dado. La figura 3.29 se muestra una etiqueta de direcciones, donde el instrumento que va a comunicar es el de la dirección 24 (en nuestro caso un multímetro) a través de la GPIB de índice 0. Debe identificarse también el índice de la GPIB, que en el caso de ser única, se asigna con 0 por defecto y se va

incrementando en el caso de tener más de una tarjeta GPIB. Se tiene la posibilidad de modificar este valor mediante el programa de NI *Measurement & Automation Explorer*, si fuese necesario.

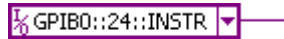


Figura 3.29. Etiqueta de direcciones en LabView.

Los instrumentos de medida que disponemos en nuestro laboratorio utilizan las siguientes direcciones:

- Keithley 182: dirección 30.
- Keithley 6517A: dirección 27.
- Keithley 6487: dirección 29.
- Keithley 2410: dirección 26.
- Agilent 34401A: direcciones 22 y 24.

3.6. Panel frontal básico.

El criterio de diseño seguido para la distribución de los distintos elementos en el panel frontal se basa en el agrupamiento por bloques funcionales que son comunes a todos los programas. En el caso de las aplicaciones más específicas este diseño puede variar ligeramente, pero manteniendo la esencia de la misma distribución de bloques, como se muestra en la figura 3.30.



Figura 3.30. Panel frontal del programa Keithley 6517A.

Los controles están distribuidos en la mitad izquierda del panel de control y en su parte inferior. Los indicadores, se fijan en la mitad derecha superior, pudiendo ocupar toda la parte derecha si el número fuese elevado.

3.6.1. Bloque 0.

- *Bloque 0*: corresponde con el nombre del instrumento y de la aplicación. En el margen derecho del bloque encontraremos siempre el nombre del instrumento de medida cuya implementación se lleva a cabo (véase la figura 3.31). Por nombre del instrumento se entiende la marca del fabricante y el modelo concreto.



Figura 3.31. Nombre el instrumento implementado.

En la parte izquierda de este bloque encontramos el nombre dado a la aplicación del programa (véase la figura 3.32). Un programa puede tener varias aplicaciones desarrolladas para un mismo instrumento o para varios instrumentos.



Figura 3.32. Nombre de la aplicación visualizada.

El nombre de la aplicación o etiqueta más utilizada es *Temp Module*, correspondiente con el módulo de temperatura que se abordará en la descripción del bloque 2. Para cambiar de aplicación es necesario pulsar en esta etiqueta y se desplegarán todas las aplicaciones disponibles. Otra aplicación muy utilizada es la de *Temp only*, que sirve únicamente para medidas de temperatura.

La herramienta utilizada para que cada aplicación tenga su propio diseño, tanto de controles como de indicadores, es *Tab Control*, como fue descrito anteriormente.

3.6.2. Bloque 1.

- *Bloque 1*: corresponde con los botones de control de la aplicación. Son elementos comunes a todas las aplicaciones creadas.
 - o *Start*: al pulsar este botón (véase la figura 3.33) se da comienzo a la ejecución de la secuencia de lectura. Al comienzo del programa este control se encuentra deshabilitado, pues es necesario pulsar previamente Setup y mandar al instrumento las instrucciones de configuración. Después de pulsar Setup, el botón Start se habilita para su uso.



Figura 3.33. Control Start.

- *Exit*: al pulsar el botón Exit (véase la figura 3.34) el programa sale del modo de ejecución y va al modo de espera. Si se encontraba en espera, se cierra la aplicación. En ocasiones podría estar presente el botón *Setup* dentro de esta distribución.



Figura 3.34. Control Exit.

- *Output File*: este control (véase la figura 3.35) permite seleccionar la manera que en los datos obtenidos de las medidas son guardados y/o mostrados al usuario.

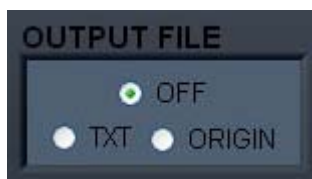



Figura 3.35. Control Output File.

Cuando se selecciona OFF, los datos de la medida no se guardarán, por lo que únicamente se mostrarán en los indicadores del panel de control destinados a tal fin.

En el caso de seleccionar TXT, los datos se guardarán en un archivo de texto, cuyo nombre será introducido por un usuario.

En el caso de optar por ORIGIN, el control  se muestra en el panel de control. Los datos se transfieren al programa Origin 8, donde quedan recogidos en una tabla. Si el control Show está seleccionado, el programa Origin se abre antes de interaccionar la descarga de datos a su tabla.

3.6.3. Bloque 2.

- *Bloque 2*: corresponde al módulo de temperatura presente en los programas. Dada la importancia que tiene la temperatura en la caracterización de las medidas eléctricas del DUT se consideró necesario la creación de un módulo de temperatura, que en función de la temperatura presente en el laboratorio (mediante un control en el panel), determinase en qué condiciones de temperatura se estaban realizando las medidas.

Así pues, la temperatura es calculada a partir de la diferencia de potencial medida en un termopar tipo K por un instrumento, normalmente el multímetro Agilent 34401A.

Este módulo, presenta, como norma general, un selector ON/OFF que permite habilitarlo o deshabilitarlo (véase la figura 3.36). En el caso del instrumento Keithley 6517A, éste presenta su propio convertidor interno para termopares tipo K, por lo que en este caso, la medida de temperatura siempre será registrada, ya sea por este uso o por el empleo de un multímetro.

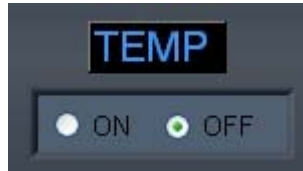


Figura 3.36. Control del módulo de temperatura.

Cuando el selector se posiciona en ON, aparece visible un nuevo control para indicar la dirección del multímetro a utilizar.

3.6.4. Bloque 3.

- *Bloque 3:* corresponde con el módulo de fuente de salida. Presenta los controles de configuración de la salida (véase la figura 3.37). En el caso de que el instrumento de medida no cuente con una fuente de salida, este bloque no estará presente.

Cuando la fuente tiene varios modos de funcionamiento como nivel o rampa, estará presente un control para poder seleccionarlos. También serán visibles los controles de los valores correspondientes a cada modo.

Rangos, límites, en ocasiones tipo de fuente, si es posible, son otros de los controles de este bloque.

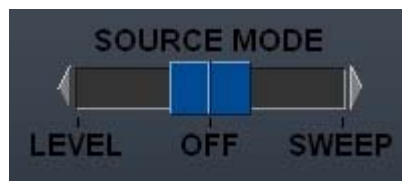


Figura 3.37. Control del modo de fuente.

Normalmente, cuando el control de modo está en *level* (nivel) el control de activación/desactivación de la fuente es controlado a nuestra voluntad (véase la figura 3.38). Por el contrario, cuando el modo de fuente está en *sweep* (rampa), este control pasa a estar bloqueado y se activa y desactiva cuando comienza y termina la rampa respectivamente.

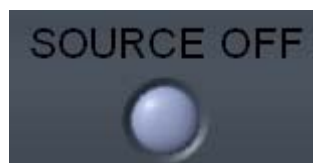


Figura 3.38. Control de activación/desactivación de la fuente.

3.6.5. Bloque 4.

- *Bloque 4:* corresponde con los controles de configuración del instrumento y de la medida.
 - o *Selector de medida:* es necesario identificar las distintas funciones de medida posibles en cada instrumento para poder establecer el selector de medida de todas ellas (véase la figura 3.39). Según el tipo de

medida escogido pueden desplegarse opciones específicas para esa función.



Figura 3.39. Selector de medida.

- *Resolution*: al pulsar este control (véase la figura 3.40) se despliegan las resoluciones de pantalla permitidas por el instrumento. Al referirnos al dígito más significativo (a la izquierda en la pantalla) lo hacemos como dígito $\frac{1}{2}$, ya que únicamente puede ser “0” ó “1”. El número que va delante del $\frac{1}{2}$, indica el número de dígitos que se emplean aparte del significativo para mostrar la medida.

Por ejemplo, para una resolución de 5 $\frac{1}{2}$ la de pantalla muestra lo siguiente: 10.289,5.

Para aumentar la exactitud de una medida y mejorar el rechazo de ruido, se debe seleccionar una resolución con un número de dígitos mayor. Sin embargo, si lo que se necesita es aumentar la velocidad de medida, se debe escoger una resolución con menor número de dígitos, como se contó en el apartado 2.2.1.

- *Range*: al pulsar este control (véase la figura 3.40) se despliegan los distintos rangos permitidos. Las opciones de rango varían en función de la selección de medida escogida en el selector de medida.

Como norma general, se puede hacer que el instrumento seleccione automáticamente el rango utilizando el autorango (AUTO) o se puede seleccionar un rango fijo utilizando medida manual. Cuando el rango es manual, el rango seleccionado es local para la función. Seleccionar un rango de medida equivocado puede dañar al instrumento, por lo que se recomienda medir en AUTO si se desconoce el nivel de señal a medir.



Figura 3.40. Controles Resolution y Range.

- *Rate*: este control (véase la figura 3.41) hace referencia a las distintas opciones permitidas para el tiempo de integración. El tiempo de integración es el período durante el cual el convertidor A/D del instrumento muestra la señal de entrada para una medida. Para medidas más rápidas hay que utilizar un tiempo de integración más corto.

El tiempo de integración se especifica en número de ciclos de línea de alimentación (NPLCs).

El control Rate puede aparecer agrupado en rangos cualitativos, como slow, med, fast, o cuantitativos, cuando se presentan muchas opciones referidas en número de ciclos NPLC, por ejemplo: 0.2, 1, etc.



Figura 3.41. Control Rate.

- *Samples*: con este control (véase la figura 3.42) especificamos el número de medidas que van a realizarse en nuestro ciclo de medida. Debajo del número de medidas aparece un indicador con números en rojo que nos muestra el número de medidas pendientes. El control Samples es interactivo al permitir ser modificado durante todo el proceso de medida. Si se desea continuar con un proceso de medida, es posible, aumentando este número de muestras antes de que el indicador de muestras restantes alcance el valor 0.
- *Delay*: este control (véase la figura 3.42) corresponde al tiempo introducido por software para retrasar el período entre medida y medida.

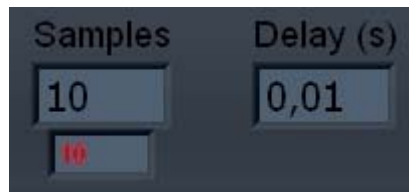


Figura 3.42. Controles Samples y Delay

- *Display*: al activar este control (véase la figura 3.43) la pantalla se apaga. Cuando está desactivado (por defecto) la pantalla se muestra encendida, funcionando normalmente. Es útil en el caso de disponer de DUT fotosensible o procesos que puedan verse afectados por la luz emitida por la pantalla. Solamente estará presente en aquellos instrumentos que permitan el apagado remoto de la pantalla.



Figura 3.43. Control Display.

- *Setup*: al presionar este botón (véase la figura 3.44), son mandadas al instrumento todas las instrucciones para la configuración del instrumento y de la medida. Después de configurar todos los controles presente en el bloque 4, es necesario pulsar este botón para que estos cambios sean actualizados en el instrumento.

Tras pulsarlo, se habilita el botón Start que permite lanzar el ciclo de medida.



Figura 3.44. Control Setup,

Los controles anteriormente explicados son comunes a todos los programas, estando presentes en todos los paneles frontales. Sin embargo, aparecerán nuevos controles más específicos, ya sean debidos características especiales de éstos o a posibilidades de configuración más complejas. Estos controles serán explicados más adelante, en el capítulo 4, correspondiente a los programas modulares.

3.6.6. Bloque 5.

- *Bloque 5*: corresponde a los indicadores de la aplicación (véase la figura 3.45). Estos elementos están ubicados en este bloque del panel frontal y es donde se visualizan los resultados obtenidos de las medidas.

En él quedan representadas las gráficas de la magnitud medida en función del tiempo. También están presentes otros indicadores como el valor de la media, su magnitud, así como los valores correspondientes al módulo de temperatura.

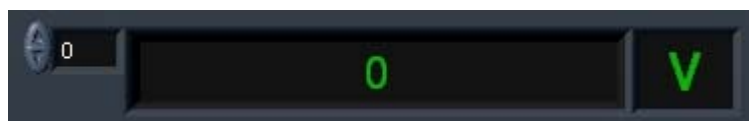


Figura 3.45. Conjunto del indicador para la medida resultante.

Es importante destacar que el indicador de medida lleva asociado a su derecha el control de unidad de la medida y en su parte izquierda un índice que indica el orden de la medida según su llegada. Resulta útil, ya que después de la realización de una secuencia de lecturas y tras pasar al estado de reposo, quedará representada la última medida, pudiendo ser consultadas el resto, decrementando dicho índice.

La representación gráfica de la magnitud medida, según la selección de la medida, en función del tiempo, visualizará en cada instante los resultados que se vayan obteniendo durante todo el proceso de medida.

La figura 3.46 muestra la representación grafica de la media en función del tiempo.

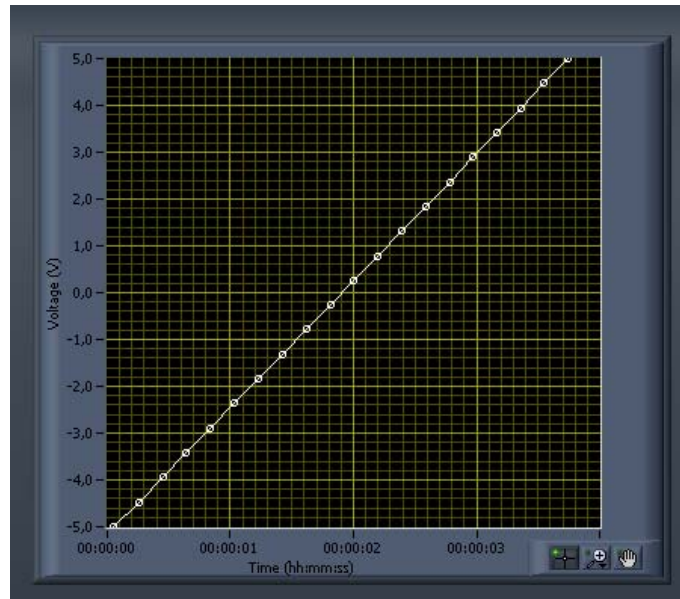


Figura 3.46. Gráfica de la medida obtenida en función del tiempo.

En el margen inferior derecho de todas las gráficas se encuentra la paleta de la gráfica (véase la figura 3.47). Es una herramienta que presenta tres modos representados en botones. Cada botón muestra un pequeño led verde cuando está habilitada.



Figura 3.47. Paleta de la gráfica.

- Botón 1: permite mover el cursor en la pantalla de la gráfica.
- Botón 2: permite alejarse y acercarse sobre la pantalla de la gráfica. Tiene varias opciones de zoom.
- Botón 3: permite coger la gráfica visualizada y desplazarla por la pantalla de la representación gráfica.

3.7. Instrumentos virtuales comunes (subVIs).

Bajo la denominación de archivos comunes se presentan los sub-VIs que, dada su funcionalidad específica y repetitiva en nuestras aplicaciones, fueron desarrollados como funciones independientes con su propio código, pudiendo ser introducidas en cualquier punto del diagrama de bloques de nuestros programas.

Cuando en un diagrama de bloques insertamos un VI, este queda representado por un icono a modo de bloque, siendo posible su conexión con los demás elementos del diagrama mediante cables que salen de los puntos de entradas y salidas (véase la figura 3.48).

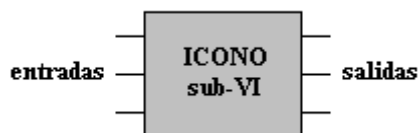


Figura 3.48. Icono genérico de un subVI.

En ocasiones, la función de este icono es la realizar cálculos y algoritmos con los datos de entrada, proporcionando los resultados del cálculo a la salida. En otras, se encarga de mandar comandos o códigos al instrumento tras proporcionar la dirección del instrumento y los controles que determinan la configuración introducida. Si pulsamos sobre este icono, se abre el diagrama de bloques y el panel de control correspondiente a este VI.

3.7.1. V to °C.vi

Es un conversor de voltios (V) a temperatura (°C). Este subVI (véase la figura 3.49) devuelve un valor de temperatura a partir de la diferencia de potencial medida en un termopar tipo K. Este voltaje (V) es medido por un multímetro o un nanovoltímetro y es la entrada del subVI. La temperatura se calcula a partir de un polinomio, que aproxima las tablas de conversión del termopar tipo K, mediante un proceso de comparación con el valor de voltaje medido en el termopar. La temperatura obtenida es la salida del subVI. El polinomio utilizado, así como las tablas de conversión del termopar tipo K pueden ser consultados en la ref. [10].

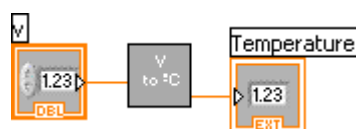


Figura 3.49. Conversor de voltaje a °C.

Para facilitar este cálculo se emplea la estructura *Formula Node* (véase la figura 3.51) asociada al polinomio. El polinomio genera el valor de voltaje que debe presentar un termopar tipo K para una temperatura dada. Para buscar que temperatura corresponde con el voltaje generado en nuestro termopar se recorre el polinomio, gracias a la estructura *While Loop*, hasta que por comparación los dos valores de voltaje (el medido en el termopar y el generado por el polinomio) coinciden (con un error prefijado de 10^{-8}) y se determina que la temperatura que genera ese valor de voltaje en el polinomio es la temperatura del termopar.

Para que el cálculo de la temperatura no demore en exceso, se realizan barridos que recorren el polinomio en dependencia del rango de temperatura asociados al valor de voltaje. Así el valor inicial de la iteración depende del valor de temperatura.

La figura 3.50 muestra el esquema del principio de funcionamiento del subVI: V to °C.vi.

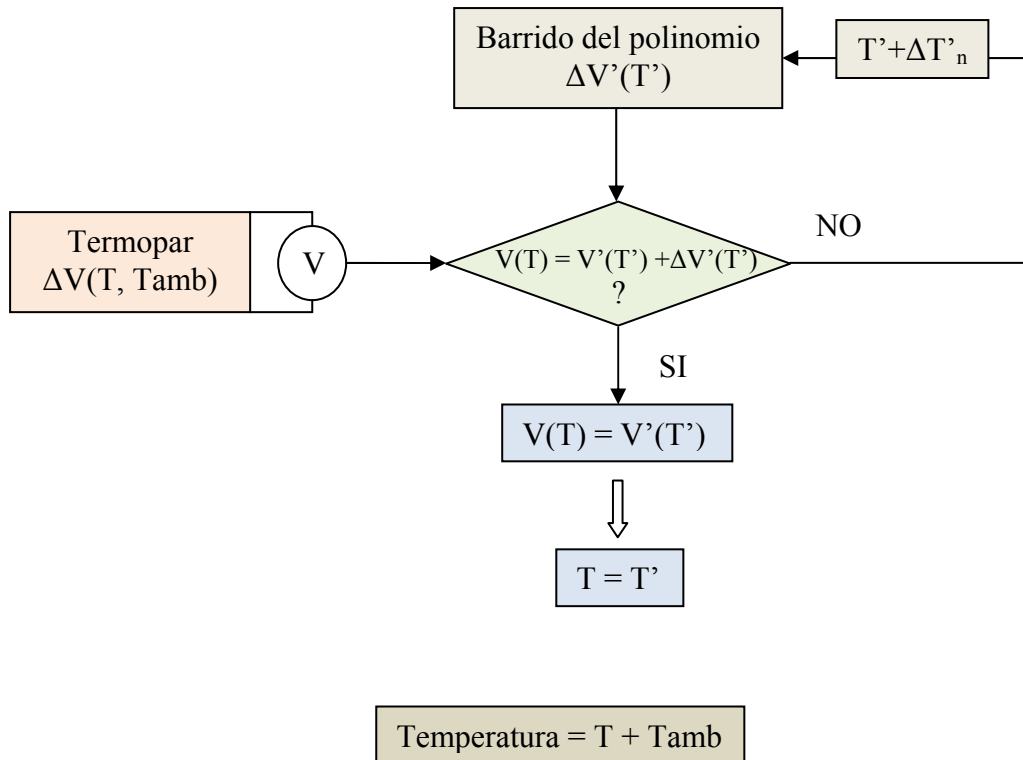


Figura 3.50. Esquema del principio de funcionamiento del subVI: V to °C.vi.

Donde:

- V = voltaje medido en el termopar tipo K.
- V'= voltaje generado por el polinomio.
- T = temperatura en el termopar tipo K.
- T'= temperatura correspondiente al voltaje del polinomio.
- Tamb = temperatura ambiente.

El polinomio a partir del cual se calcula la temperatura considera que la temperatura de la unión de referencia es de 0°C. En el laboratorio la temperatura de referencia tomada es la ambiente, por lo que, una vez realizada la conversión de V a °C hay que sumar posteriormente al valor obtenido la temperatura del laboratorio.

El termopar tipo K presenta un rango de temperaturas de -270° C a +1.370° C. Debido a que el polinomio de aproximación presenta distintos términos y coeficientes en función de si nos encontramos por debajo de 0° C o por encima, se desarrolló el subVI para que permitiese el cálculo de temperaturas en dependencia de estos rangos.

Es necesario conectar correctamente la polaridad del termopar con el instrumento a medir. Si se conecta al revés, se medirá en el termopar un valor de voltaje de signo contrario al valor verdadero, y no se obtendrá el valor real de temperatura a la salida del sub-VI.

Este subVI presenta un alto grado de portabilidad, ya que puede ser utilizado en cualquier programa de LabView en el que se pretenda conocer la temperatura

que proporciona un termopar tipo K a partir de la medida de voltaje que proporcione un instrumento de precisión.

Se emplea este subVI en la programación del cálculo de temperatura y del módulo de temperatura en nuestros programas modulares.

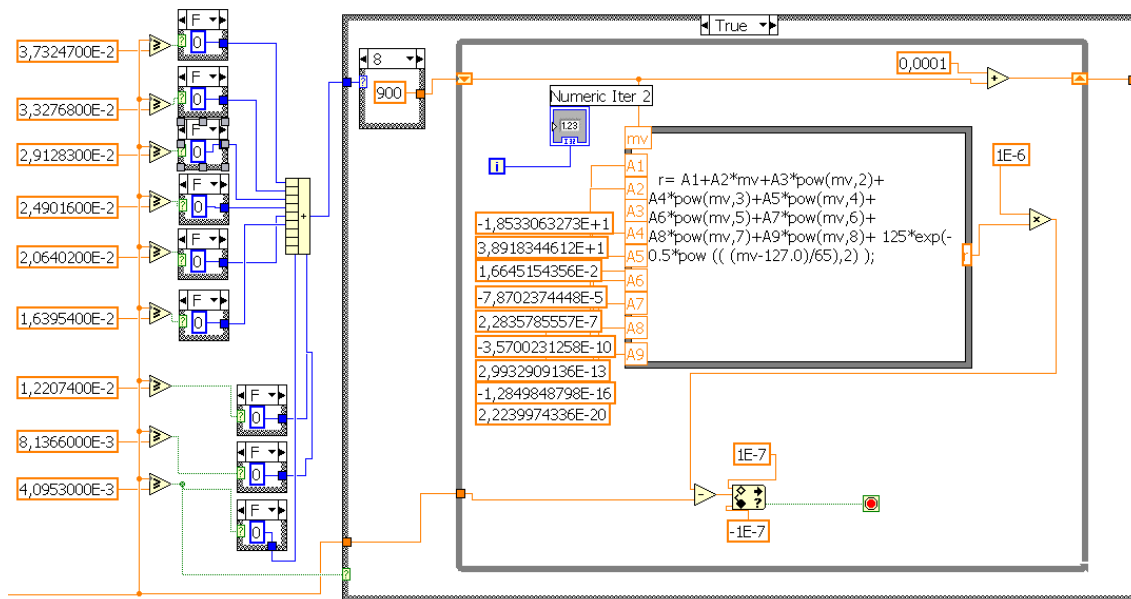


Figura 3.51. Detalle del diagrama de bloques del convertor de voltaje a temperatura.

3.7.2. TEMP HP.vi

Este subVI (véase la figura 3.52) se basa en el convertor V to °C.vi. Debido a que al anterior convertor hay que sumarle la temperatura del laboratorio para obtener la real y que en la mayoría de los casos es un multímetro el que mide el voltaje a convertir, se decidió crear un subVI, en el que estos parámetros pasasen a ser entradas del VI. La temperatura real es, por tanto, la salida de esta función.

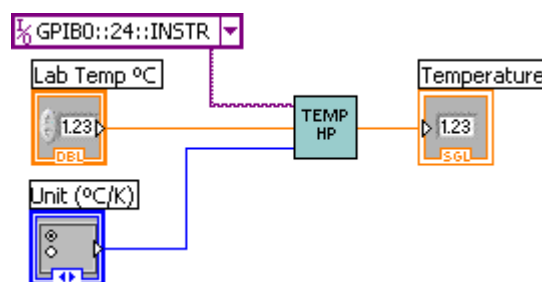


Figura 3.52. Sub-VI Temp HP con entradas y salidas.

Se debe introducir la dirección del multímetro a utilizar. En nuestro caso las direcciones son la 22 y la 24. Esta consulta se realiza desde el panel frontal, una vez que el módulo de temperatura (TEMP) sea puesto a ON.

La temperatura ambiente, *Lab Temp*, será introducida en este mismo bloque. El selector que permite determinar las unidades de la temperatura a convertir, bien sea °C o K, está posicionado en el panel de control al lado del indicador que muestra el valor obtenido. De este modo hace el doble juego de ser control e indicar visualmente la unidad en que se da la temperatura. El indicador de temperatura se encuentra en el bloque del panel de control destinado a todos los resultados e indicadores.

Se emplea este subVI en la programación del módulo de temperatura presente en nuestros programas y que fue descrito en el bloque 2 del panel de control básico, en el apartado 3.6.3.

3.7.3. ORIGIN.

Origin es un programa de análisis numérico que permite analizar datos y generar gráficos técnicos en 2D y 3D especialmente pensado para ingenieros y científicos. Permite organizar y reflejar en un informe todos los resultados obtenidos de un estudio o una investigación. Una de sus grandes ventajas es que dispone de un entorno de programación compatible con LabVIEW.

Los sub-VIs desarrollados para Origin permiten que los resultados obtenidos sean cargados a este entorno. La secuencia de lectura será volcada al programa Origin 8, quedando mostrada en una tabla. Con el fin de dar agilidad a esta tarea, se decidió subdividir la acción total en 3 partes. De esta forma, se crearon 3 sub-VI que podrán ser utilizados en distintas partes del programa, según la acción requerida. La denominación de estas partes quedó referenciada en el nombre. Así, la primera parte se denominó A, la segunda, B y la parte final, C (véase la figura 3.53).

○ 3.7.3.1. *ORIGIN xCOL subvi-A.vi*

Es el encargado de abrir el programa y generar la tabla donde se cargarán los datos. Cuando el control *Show*, que es visible por el usuario, está seleccionado, el programa Origin es mostrado al usuario. Si no está activo, el programa se carga en memoria, pero no se muestra al usuario por pantalla.

A la hora de generar la tabla en la hoja de trabajo, debemos especificar el número de columnas que tendrá la tabla a cargar con los datos. La llamada al control se encarga de ello, ya que este dato se proporciona directamente desde la programación de cada aplicación.

○ 3.7.3.2. *ORIGIN xCOL subvi-B*

Es la función que se encarga de cargar los valores resultantes en la tabla. Previamente, se identifica el nombre de cada una de las columnas y su tipo (para eje X, Y, etc.).

Dado que estas acciones no son transparentes al usuario y se realizan automáticamente desde el diagrama de bloques, fue necesario crear varios sub-VIs en función del número de columnas empleadas por cada aplicación. De este modo se asigna

automáticamente el tipo y nombre de cada columna. De este modo tenemos los siguientes archivos:

- *ORIGIN 2COL subvi-B.vi*
- *ORIGIN 3COL subvi-B.vi*
- *ORIGIN 4COL subvi-B.vi*
- *ORIGIN 5COL subvi-B.vi*
- *ORIGIN 6COL subvi-B.vi*
- *ORIGIN 7COL subvi-B.vi*
- *ORIGIN 8COL subvi-B.vi*

○ 3.7.3.3. *ORIGIN xCOL subvi-C.vi*

Se encarga de guardar el proyecto realizado en Origin y salir de la aplicación. Una vez terminado el proceso B se ejecutará el C, donde se abre una ventana de diálogo en la que se pregunta por el nombre en el que será grabado el proyecto.

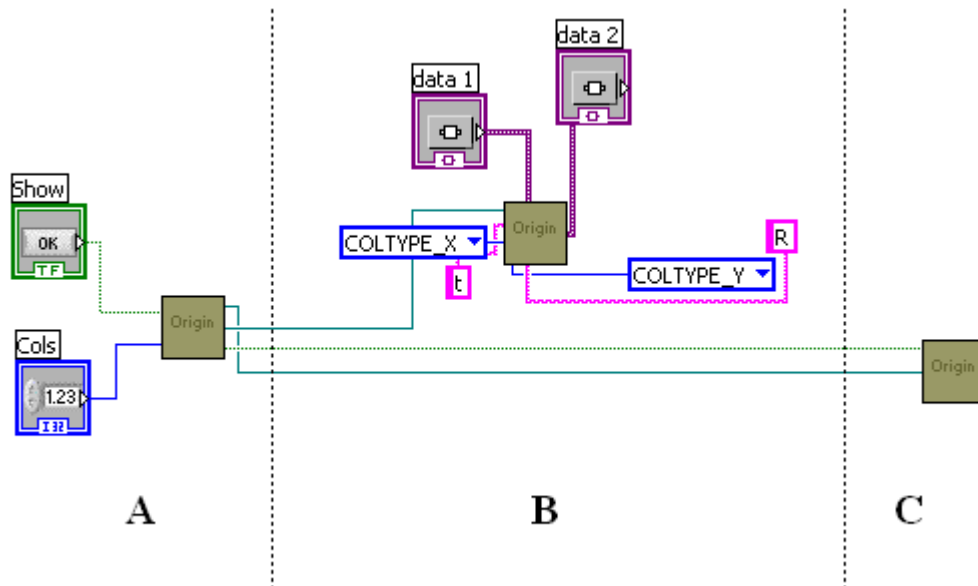


Figura 3.53. Archivos subVIs para la interacción con Origin 8.

Como se ha comentado anteriormente, en la figura 3.53 puede verse el proceso completo de comunicación con Origin. Sin embargo, en las aplicaciones, las 3 partes se ejecutan en distintos momentos, aunque siempre en el mismo orden A-B-C. Con ello, se está tratando de optimizar la carga de los datos y que la apertura y posterior cierre de la sesión de Origin no demore el ciclo de lectura del propio instrumento.

3.7.4. arreglo.vi

Esta función (véase la figura 3.54) se encarga de, para dos vectores de resultados dados (array y array2), proporcionar a la salida (Measurements) un vector basado en los datos del vector array y de las mismas dimensiones que el vector array2.

Se trata por tanto de un arreglo a las dimensiones de la entrada array. Esta función se coloca a la salida de las lecturas de temperatura del multímetro (array) y de otro instrumento (array2). Sirve para solventar situaciones en las que en la lectura simultánea de varios instrumentos, el multímetro no haya reportado el mismo número de medidas que otros instrumentos.

Cuando los dos vectores (array y array2) presenten las mismas dimensiones, el vector de salida será el mismo que el de temperatura (array).

En el caso de que el tamaño del vector de temperatura (array) sea menor que el de array2, el vector de salida será el de temperatura completado con su último valor hasta alcanzar la misma dimensión que el vector array2.

En el caso de que el tamaño del vector de temperatura (array) sea mayor que el de array2, el vector de salida será el de temperatura pero en su último valor se cargará el promedio de los valores que excedan de las dimensiones de array2.

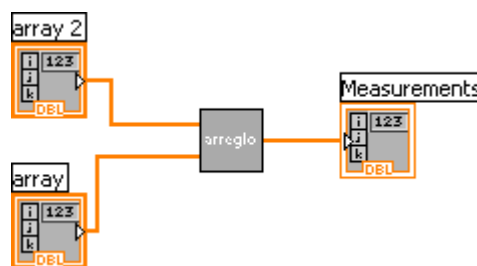


Figura 3.54. Sub-VI *arreglo.vi* con entradas y salidas.

3.7.5. 2410.

Se desarrollaron varios subVIs para el instrumento de medida Keithley 2410, ya que, debido a su mayor complejidad de programación, permiten identificar y sistematizar sus acciones más comunes o repetitivas.

Para una rápida identificación, el nombre de todos los archivos comienza por 2410. A continuación se describe el modo de funcionamiento del instrumento. Si es con fuente de salida por nivel: LEVEL. Si por el contrario se utiliza la fuente en modo de rampa programable: SWEEP.

Por último, se describe en el nombre del archivo la función general que desarrollan. De este modo, tenemos:

- 3.7.5.1. 2410 LEVEL ini.vi

Corresponde con la función inicial de lectura por nivel de fuente y permite realizar la configuración del disparo (trigger) para este tipo de lecturas (véase la figura 3.55). Se configura para un disparo interno inmediato. El modo de salida será para un nivel fijo (fixed). Se devuelve la etiqueta de direcciones del instrumento empleado.

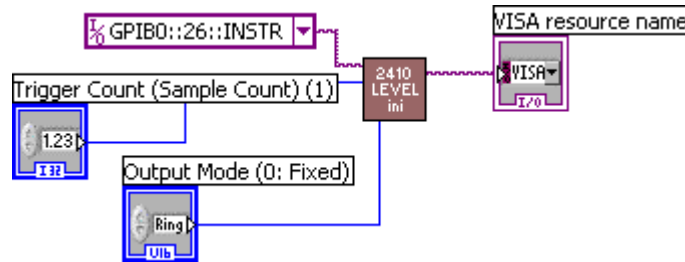


Figura 3.55. Archivo *2410 LEVEL ini.vi* con entradas y salidas.

○ 3.7.5.2. *2410 LEVEL read.vi*

Corresponde con la función de lectura por nivel propiamente dicha. Una vez realizado la configuración del disparo realizada por el subVI anterior, se procede a realizar el disparo y se realiza la lectura para su posterior descarga a los indicadores correspondientes (véase la figura 3.56).

El instrumento proporcionará la lectura de voltaje, corriente, resistencia y tiempo para un mismo disparo. La función devuelve la etiqueta de direcciones del instrumento usado.

Como parámetro de entrada aparece *timeout*. Es el tiempo que se espera para que la acción de lectura se cumpla. Si transcurrido el tiempo programado el instrumento no ha completado la tarea de realización de la lectura, se generará un error.

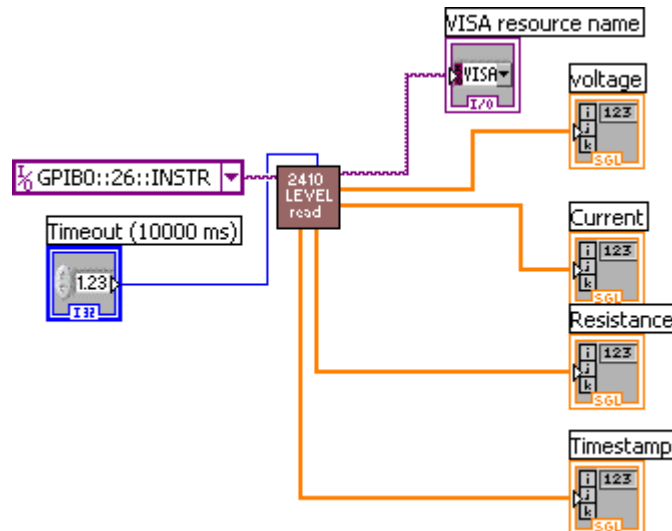


Figura 3.56. Archivo *2410 LEVEL read.vi* con entradas y salidas.

○ 3.7.5.3. *2410 SWEEP config.vi*

Este archivo permite la función de configuración de los parámetros del barrido (sweep) programable presente en el instrumento Keithley 2410. La función devuelve la etiqueta de direcciones del instrumento usado (véase la figura 3.57).

Los comandos para configurar el modo de la fuente (voltaje o corriente), el rango de funcionamiento, el número de puntos y la dirección del barrido son enviados al instrumento.

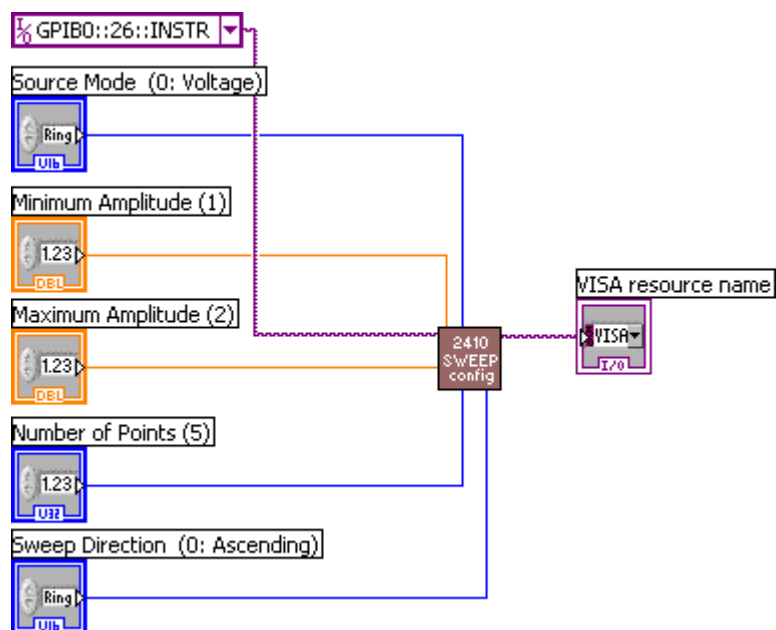


Figura 3.57. Función 2410 SWEEP config.vi con entradas y salidas.

3.7.5.4. 2140 SWEEP ini.vi

Corresponde con la función inicial de lectura por barrido (sweep) de fuente y permite realizar la configuración del disparo (trigger) para este tipo de lecturas (véase la figura 3.58). Se configura para un disparo interno inmediato. El modo de salida será para un nivel de barrido programado con la anterior función. Se devuelve la etiqueta de direcciones del instrumento empleado.

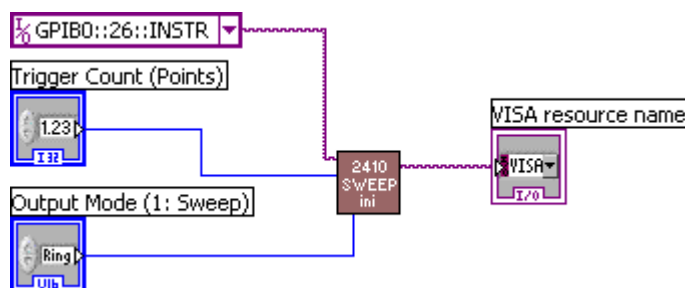


Figura 3.58. Función 2410 SWEEP ini.vi con entradas y salidas.

3.7.5.5. 2410 SWEEP tlink.vi

Corresponde con la función de lectura por barrido (sweep) de la fuente del instrumento (véase la figura 3.59). La denominación tlink utilizada en su nombre corresponde con la utilización de este subVI en el programa KEITHLEY 2410-6517A-6487.vi, que permite la configuración de disparo con Trigger Link, cuyo funcionamiento se detalló en el apartado 2.1.3.3.5 de esta memoria.

Su ejecución permite realizar el barrido programado y se realizan las lecturas para su posterior descarga a los indicadores correspondientes. El instrumento proporcionará lecturas de voltaje, corriente, resistencia y

tiempo. La función también retorna la etiqueta de direcciones del instrumento usado. Como parámetro de entrada aparece *timeout*, descrito anteriormente.

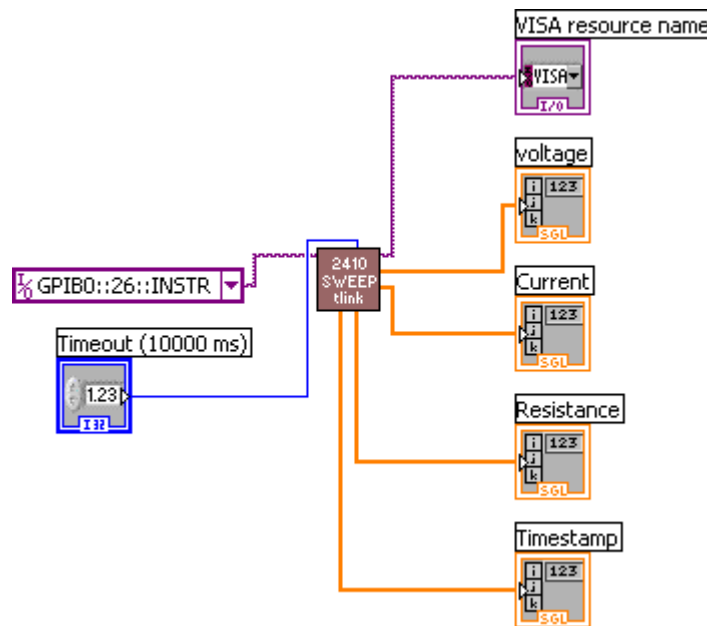


Figura 3.59. Función 2410 SWEEP tlink.vi con entradas y salidas.

3.8. Niveles jerárquicos.

Se desarrollaron programas modulares para los instrumentos: multímetro Agilent 34401A, nanovoltímetro Keithley 182, picoamperímetro Keithley 6487, electrómetro Keithley 6517A y SourceMeter Keithley 2410. También se desarrolló un programa específico en el que se integran los tres instrumentos: SourceMeter, electrómetro y picoamperímetro. Todos estos programas serán descritos con detalle en el capítulo 4.

La jerarquía de un programa está organizada por niveles bien definidos. Los VIs de un nivel se apoyan en los del nivel inmediatamente inferior y no hay saltos entre niveles. Como se puede apreciar en las figuras, en la jerarquía de llamadas entre sub-VIs de una aplicación dada no aparece la distribución de código, ni la de estructuras desarrolladas en el programa, aunque se haya programado en bajo nivel mayoritariamente, como es nuestro caso. Podemos ver que el nivel superior en toda la jerarquía es el entorno de desarrollo LabView.

Cuando se usan VIs dentro de otros, se va creando una jerarquía de VIs. Además de permitir ver la estructura de un proyecto de forma gráfica, también es de gran utilidad para buscar los sub-VIs que intervienen en cada programa. Los sub-VIs utilizados han sido descritos con detalle en el apartado 3.7.

La figura 3.60 muestra la estructura de jerarquía del programa desarrollado para el multímetro Agilent 34401A.

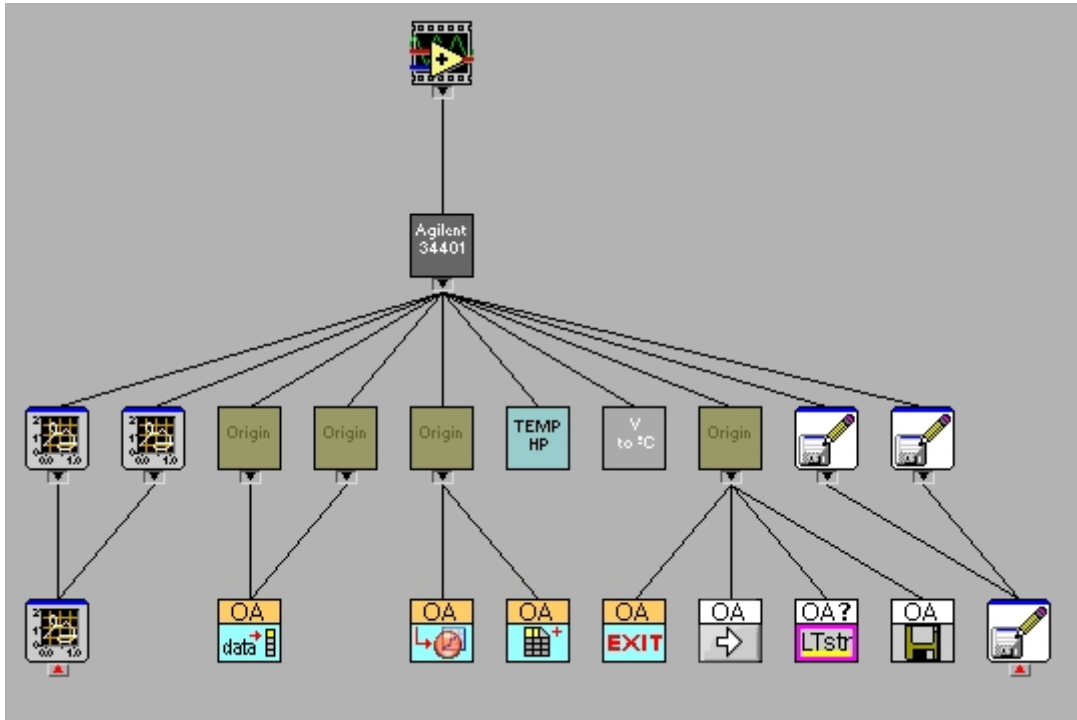


Figura 3.60. Jerarquía de programa del instrumento Agilent 34401A.

La figura 3.61 muestra la estructura de jerarquía del programa desarrollado para el nanovoltímetro Keithley 182.

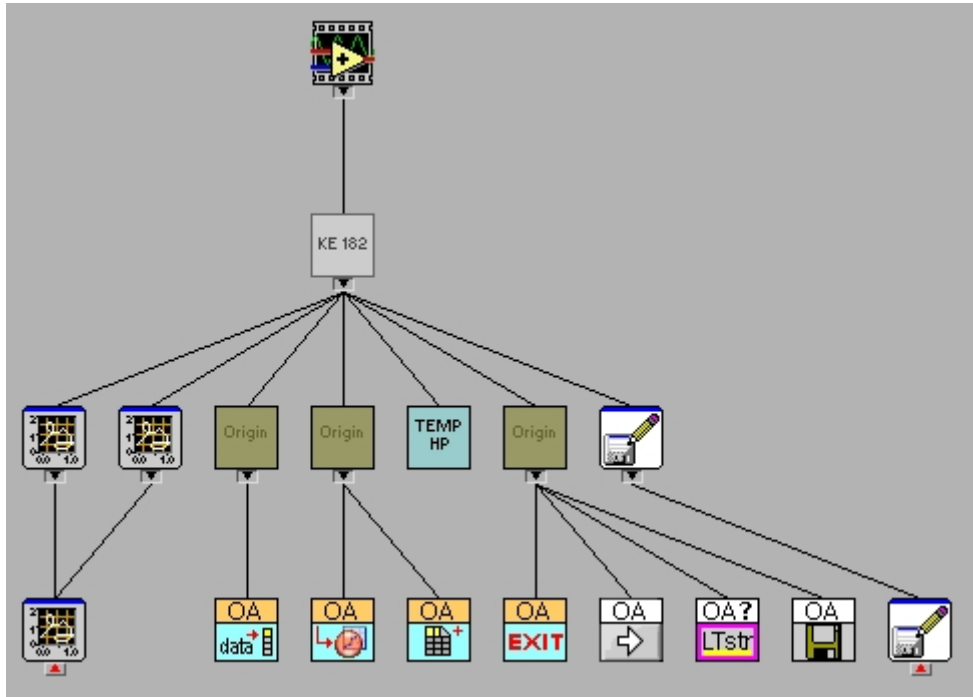
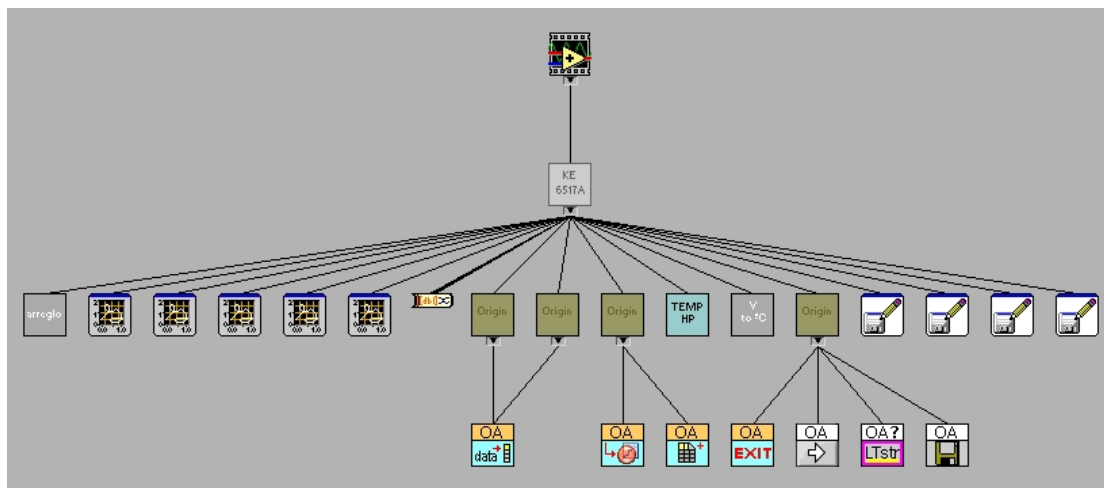


Figura 3.61. Jerarquía de programa del instrumento Keithley 182.

The diagram illustrates a hierarchical knowledge structure for a diagnostic system. At the top is a node labeled 'KE 648T'. This node branches into several child nodes: 'arreglo', four '2-DIGIT 0.00 -1.0' nodes, a 'Lab' node, three 'Origin' nodes, 'TEMP HP', 'V to °C', and another 'Origin' node. These nodes further branch into more specific nodes: the first 'Origin' node branches into 'OA data'; the second 'Origin' node branches into 'OA L+'; the third 'Origin' node branches into 'OA calculator'; the 'TEMP HP' node branches into 'OA EXIT'; the 'V to °C' node branches into 'OA arrow'; the fourth 'Origin' node branches into 'OA? LTstr'; and the fifth 'Origin' node branches into 'OA floppy disk'.

La figura 3.63 muestra la estructura de jerarquía del programa desarrollado para el electrómetro Keithley 6517A.



151

La figura 3.64 muestra la estructura de jerarquía del programa desarrollado para el instrumento SourceMeter Keithley 2410.

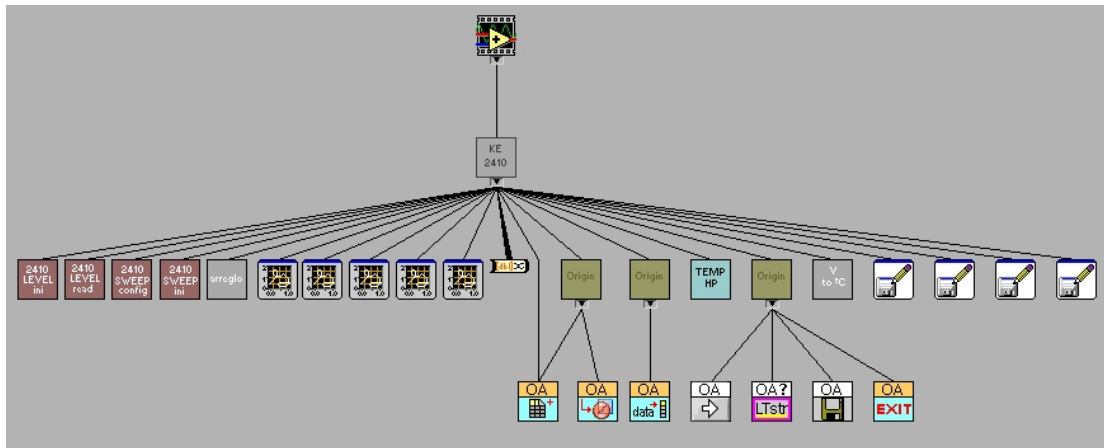


Figura 3.64. Jerarquía de programa del instrumento Keithley 2410.

La figura 3.65 muestra la estructura de jerarquía del programa desarrollado para los instrumentos: Keithley 2410,6517A y 6487.

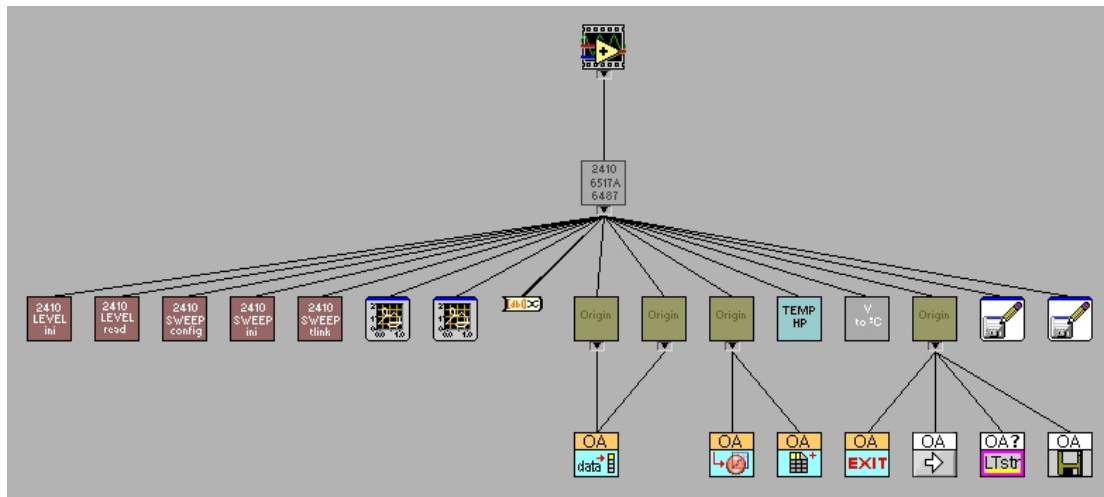


Figura 3.65. Jerarquía de programa de los instrumentos: Keithley 2410,6517A y 6487.



4. PROGRAMAS MODULARES Y ESPECÍFICO

4. PROGRAMAS MODULARES Y ESPECÍFICO.

En este capítulo se describen los programas desarrollados en la plataforma de programación LabView para implementar los instrumentos modulares: multímetro Keithley 2410, nanovoltímetro Keithley 182, picoamperímetro Keithley 6487, electrómetro 6517A y SourceMeter Keithley 2410; y un programa específico que integra al electrómetro, el pico amperímetro y el SourceMeter en la misma aplicación.

Aunque en ciertas ocasiones parezca que la información descrita en los distintos apartados de este capítulo está duplicada, se ha preferido utilizar este formato para que sirva al lector como un manual de usuario que permita la utilización de cada programa independientemente.

4.1. Programas modulares.

4.1.1. Multímetro Agilent 34401A.

El programa desarrollado en la plataforma de programación LabView para el instrumento de medida Agilent 34401A dispone de dos aplicaciones específicas: *Temp module* y *Temp only*. A continuación se describen las funcionalidades de ambas aplicaciones.

En el apartado 3.6, correspondiente al panel frontal básico, se explican los elementos comunes a todos los programas. En los siguientes apartados, se explicarán con detalle los controles e indicadores específicos de cada aplicación.

Las especificaciones técnicas de este instrumento y el tipo de conexión a seguir en función de la medida que se va a realizar están recogidos en los apartados 2.1.3.2.2 y 2.1.3.3.2 respectivamente.

4.1.1.1. Aplicación *Temp module*.

Esta aplicación nos permite realizar todas las medidas eléctricas accesibles en el instrumento Agilent 34401A. Además, añade un módulo (*TEMP*) que proporciona, si se activa, la medida de temperatura junto a cada medida realizada por el instrumento.

La figura 4.1 muestra la pantalla de presentación de esta aplicación.

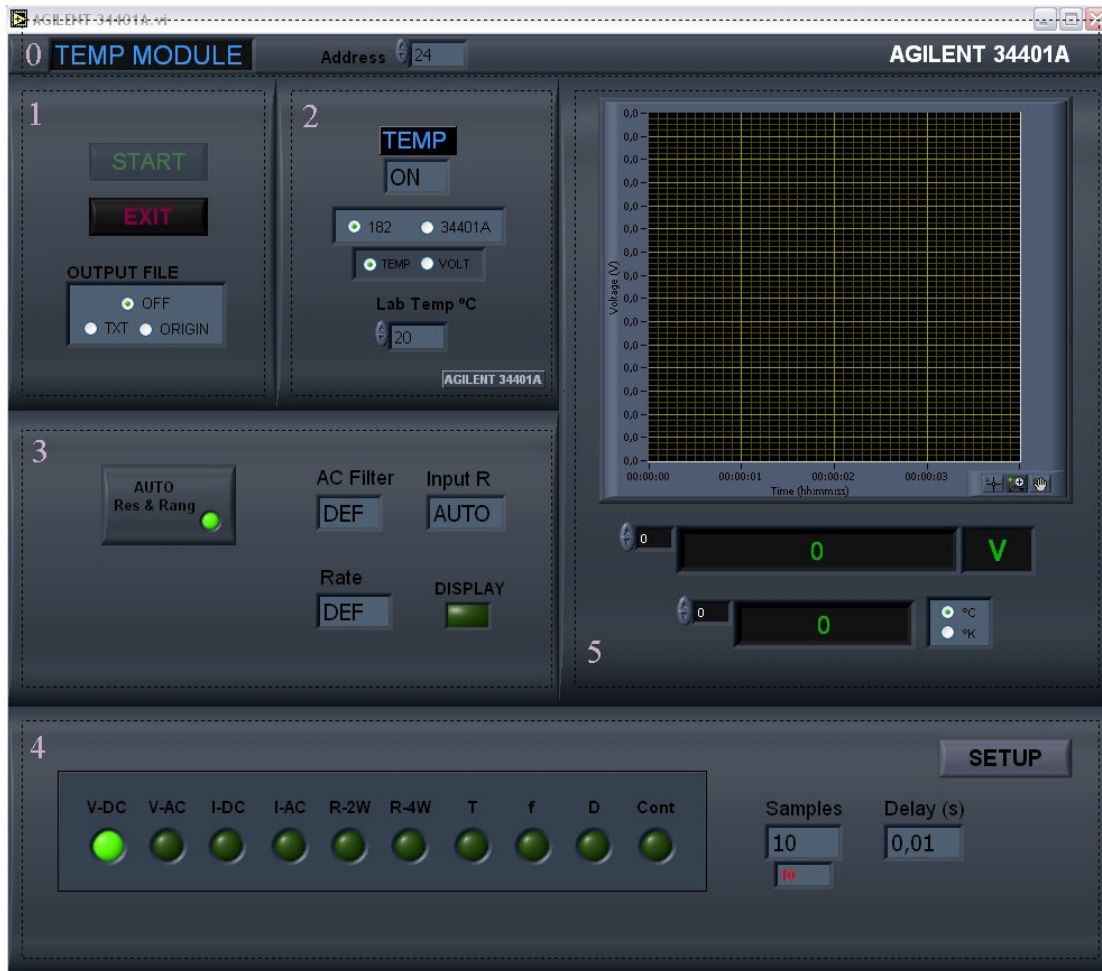


Figura 4.1. Panel frontal de la aplicación Temp module del multímetro Agilent 34401A.

4.1.1.1.1. Controles e indicadores de la aplicación.

La información contenida en el panel frontal se divide en los siguientes bloques:

- **Bloque 0:** identifica la aplicación Temp module del instrumento Agilent 34401A.
 - o *Address:* selecciona la dirección del instrumento empleado (véase la figura 4.2). Al disponer de dos instrumentos Keithley 34401A, es necesario saber cuál se va a utilizar. Mediante la dirección 22 y 24 escogemos entre una unidad u otra.

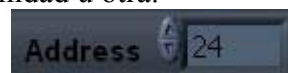


Figura 4.2. Control Address.

- **Bloque 1:** botones de control de la aplicación, comunes en todos los programas (ver apartado 3.6.2).
- **Bloque 2:** corresponde al módulo de temperatura. Con los siguientes controles:

- *TEMP*: selecciona la activación o desactivación del módulo (véase la figura 4.3). Cuando está *OFF*, no se encuentra visible ningún otro control de este bloque y el indicador correspondiente al valor de temperatura, presente en el bloque 5, se encuentra deshabilitado.



Figura 4.3. Control Temp.

Cuando está ON, aparecen los siguientes controles:

- *182/34401A*: tenemos la posibilidad de utilizar uno de estos dos instrumentos, Keithley 182 ó 34401A, para medir el voltaje del termopar a través del cual se calcula la temperatura (véase la figura 4.4). Cuando el seleccionado es el instrumento 34401A, se utilizará el instrumento con distinta dirección al que se utiliza para realizar medidas eléctricas, puesto que estamos utilizando los dos instrumentos presentes de este modelo.

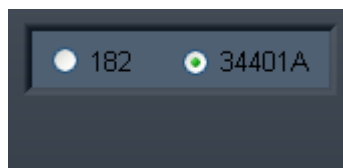


Figura 4.4. Control de selección 182/34401A.

En el caso de seleccionar el instrumento 182, aparecerá visible el control temp/volt (véase la figura 4.5) que nos permitirá escoger si la medida a mostrar en su identificador correspondiente (bloque 5) será la medida de voltaje o la de temperatura.

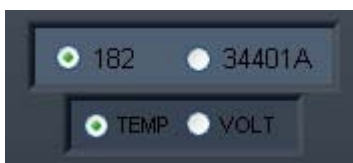


Figura 4.5. Control de selección 182/34401A y control temp/volt.

- *Lab Temp °C*: se debe introducir el valor en °C de temperatura presente en el laboratorio y que sirve de referencia para calcular la temperatura proporcionada por el termopar (véase la figura 4.6).



Figura 4.6. Control Lab Temp °C.

- **Bloques 3 y 4:** corresponde con los controles para la configuración del instrumento y de la medida.
 - *AUTO Res & Rango:* cuando el botón verde está encendido (véase la figura 4.7), significa que la resolución y el rango de medida se encuentran en modo auto. Si se pulsa el botón, se apaga, mostrándose los controles *Resolution* y *Range*, que permiten establecer manualmente los valores para resolución y rango respectivamente. Estas especificaciones fueron descritas en detalle en el apartado 2.1.3.2.2. Las funciones de medida: periodo, frecuencia, diodo y continuidad, únicamente permiten medidas para modo auto, por lo que este control permanecerá activado y bloqueado para estas funciones.



Figura 4.7. Control AUTO Res & Rango.

- *AC Filter:* permite seleccionar entre filtro de CA: lento, medio o rápido (véase la figura 4.8).



Figura 4.8. Control AC Filter.

- *Input R:* permite modificar la resistencia de entrada del multímetro con el fin de reducir efectos de carga (véase la figura 4.9).



Figura 4.9. Control Input R.

- *Rate:* permite modificar el tiempo de integración entre varias posibilidades (véase figura 4.10). El tiempo de integración afecta a la velocidad de las medidas. Para medidas más rápidas, se debe utilizar un tiempo de integración más corto. Este control sólo está disponible para las funciones de medida de voltaje y corriente en CC y resistencia a dos y cuatro puntas. Para las funciones de frecuencia y periodo, se aplica el tiempo de apertura, que es análogo al tiempo de integración. En este caso, este control es sustituido por el control *Apert* (tiempo de apertura).



Figura 4.10. Control Rate.

- *Control de selección de la función de medida:* permite seleccionar la función a medir (véase la figura 4.11). Cuando la función de medida está activa, su botón verde permanece iluminado. El resto de funciones no seleccionadas permanecen inactivas. Para cambiar entre una u otras, basta con pulsar el botón verde situado debajo de cada una de ellas, pasando la nueva a ser activada y desactivas las demás.

Las medidas que están permitidas en el multímetro son: voltaje en CA y en CC, corriente en CA y CC, resistencia a dos y cuatro puntas, período, frecuencia, diodo y continuidad.

La conexión que se debe utilizar con el instrumento para realizar las distintas funciones de medidas se explicó detalladamente en el apartado 2.1.3.3.2 de esta memoria.



Figura 4.11. Control de selección de la función de medida.

En el bloque 4 se fijan el número de muestras a tomar (control *Samples*) y el retraso de software introducido (control *Delay*).

Con el control *Setup* se los comandos de configuración al instrumento. El control display está presente en el bloque 3 y permitirá que la pantalla se apague o permanezca encendida.

- **Bloque 5:** corresponde con el bloque de los indicadores o de salida de los resultados de las medidas. Cuenta con la gráfica y el valor de la medida, además del valor de temperatura obtenida para cada medida (en el caso de estar activo el módulo de temperatura).

4.1.1.2. Aplicación Temp only.

Esta aplicación nos permite realizar medidas de temperatura a través del uso de uno de los dos instrumentos Keithley 34401A disponibles. La figura 4.12 muestra la pantalla de presentación de esta aplicación.



Figura 4.12. Panel frontal de la aplicación Temp only del instrumento Agilent 34401A.

Tanto el uso de los controles como de los indicadores presentes en este panel de control han sido descritos en el apartado anterior y en el apartado 3.6 del panel frontal básico, común a todos los programas. Se recuerda la función de sus bloques:

- **Bloque 0:** identifica la aplicación Temp only del instrumento Agilent 34401A.
- **Bloque 1:** botones de control de la aplicación, comunes en todos los programas (ver apartado 3.6.2).
- **Bloque 2:** corresponde con la función de temperatura de la aplicación, donde se selecciona la dirección del instrumento empleado y se introduce la temperatura del laboratorio para ser usada como referencia en la obtenida por el termopar tipo K.
- **Bloque 3:** corresponde con la configuración del instrumento y la medida. Se fija el número de muestras a tomar y el retraso de software introducido. Con el control Setup se los comandos de configuración al instrumento y se fija que el instrumento realice la función de medida de voltaje en CC.
- **Bloque 4:** corresponde con el bloque de los indicadores o de salida de los resultados de las medidas. Cuenta con la gráfica (temperatura en función de tiempo) y valor de la medida de temperatura. Se dispone de un control de selección de unidades para mostrar los valores en °C o K.

4.1.2. Nanovoltímetro Keithley 182.

El programa desarrollado en la plataforma de programación LabView para el instrumento de medida Keithley 182 dispone de una aplicación específica: *Temp module*. A continuación se describe la funcionalidad de esta aplicación.

En apartado 3.6, correspondiente al panel frontal básico, se explican los elementos comunes a todos los programas. En el siguiente apartado, se explicará con detalle los controles e indicadores específicos de esta aplicación.

Es necesario indicar que, en el nanovoltímetro Keithley 182, fue necesario el uso de comandos en modo DDC para su programación, puesto que no aceptaba el modo SCPI.

Las especificaciones técnicas de este instrumento y el tipo de conexión a seguir en función de la medida que se va a realizar están recogidos en los apartados 2.1.3.2.1 y 2.1.3.3.1 respectivamente.

4.1.2.1. Aplicación *Temp module*.

Esta aplicación nos permite realizar las medidas de voltaje permitidas por el nanovoltímetro Keithley 182. Además, presenta un módulo (*TEMP*) que proporciona, si se activa, la medida de temperatura para cada medida realizada por el instrumento. La figura 4.13 muestra la pantalla de presentación de esta aplicación.



Figura 4.13. Panel frontal de la aplicación Temp module del instrumento Keithley 182.

4.1.2.1.1. Controles e indicadores de la aplicación.

La información contenida en el panel frontal se divide en los siguientes bloques:

- **Bloque 0:** identifica la aplicación Temp module del instrumento Keithley 182.
- **Bloque 1:** botones de control de la aplicación, comunes en todos los programas (ver apartado 3.6.2).
- **Bloque 2:** corresponde al módulo de temperatura. Su activación implica la utilización de un instrumento Agilent 34401A. Tiene los siguientes controles:
 - o **TEMP:** selecciona la activación o desactivación del módulo (véase la figura 4.14). Cuando se selecciona *OFF*, no se encuentra visible ningún otro control de este bloque y el indicador correspondiente al valor de temperatura, presente en el bloque 4, junto con su gráfica, se encuentran deshabilitados.

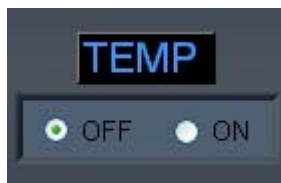


Figura 4.14. Control Temp.

Cuando se selecciona ON, aparecen los controles *Address* y *Lab Temp °C*. Como ya se ha indicado anteriormente, con el control Address identificamos la dirección del instrumento Agilent 34401A que va a ser usado para calcular la temperatura. Con el control Lab Temp °C introducimos la temperatura de referencia.

- **Bloques 3:** corresponde con los controles para la configuración del instrumento y de la medida:
 - o **Filters:** cuando este control está ON se activan los filtros del instrumento (véase la figura 4.15). Cuando están OFF, se desactivan los filtros del instrumento.



Figura 4.15. Control Filters.

- o **Rate:** permite modificar el tiempo de integración entre varias posibilidades (véase la figura 4.16). El tiempo de integración afecta a la velocidad de las medidas. Para medidas más rápidas, se debe utilizar un tiempo de integración más corto.



Figura 4.16. Control Rate.

- *Resolution*: permite fijar la resolución que empleará el instrumento al realizar sus medidas (véase la figura 4.17). La resolución de $6 \frac{1}{2}$ es la que carga el instrumento por defecto, pudiéndose escoger también: $3 \frac{1}{2}$, $4 \frac{1}{2}$ y $5 \frac{1}{2}$.



Figura 4.17. Control Resolution.

- *Range*: permite fijar el rango de medida (véase la figura 4.18). Se puede seleccionar auto rango o un rango manual del desplegable. Los rangos de funcionamiento quedaron descritos con detalle en el apartado 2.1.3.2.1 de esta memoria.

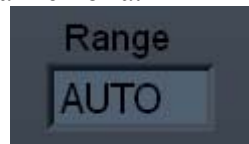


Figura 4.18. Control Range.

En este bloque se fija el número de muestras a tomar (control *Samples*) y el retraso de software introducido (control *Delay*). Con el control *Setup* se envían los comandos de configuración al instrumento.

- **Bloque 4:** corresponde con el bloque de los indicadores o de salida de los resultados de las medidas. Cuenta con el valor correspondiente a la medida y su gráfica en función del tiempo. También el valor de temperatura obtenida para cada medida y su gráfica en función del tiempo (véase la figura 4.19), que estarán activos con el módulo de temperatura activado.

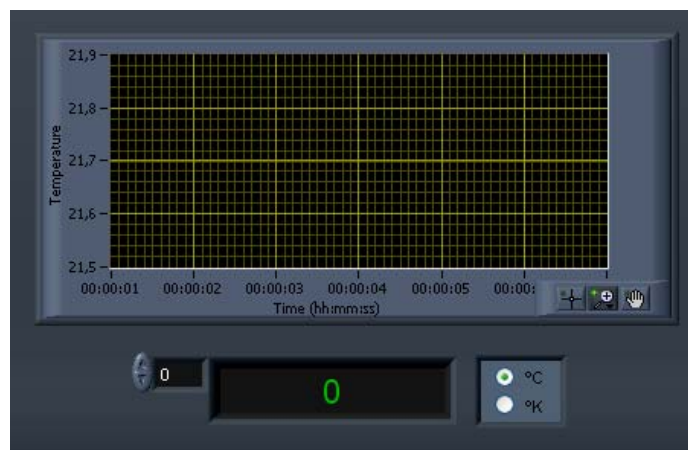


Figura 4.19. Indicadores para la medida del módulo de temperatura.

4.1.3. Picoamperímetro Keithley 6487.

El programa desarrollado en la plataforma de programación LabView para el instrumento de medida Keithley 6487 dispone de dos aplicaciones específicas: *Temp module* y *Temp only*. A continuación se describen las funcionalidades de ambas aplicaciones.

En el apartado 3.6, correspondiente al panel frontal básico, se explican los elementos comunes a todos los programas. En los siguientes apartados, se explicarán con detalle los controles e indicadores específicos de cada aplicación.

Las especificaciones técnicas de este instrumento y el tipo de conexión a seguir en función de la medida que se va a realizar están recogidos en los apartados 2.1.3.2.3 y 2.1.3.3.3 respectivamente.

4.1.3.1. Aplicación *Temp module*.

Esta aplicación nos permite realizar todas las medidas eléctricas accesibles en el instrumento Keithley 6487. Además, añade un módulo (*TEMP*) que proporciona, si se activa, la medida de temperatura para cada medida realizada por el instrumento. La figura 4.20 muestra la pantalla de presentación de esta aplicación.



Figura 4.20. Panel frontal de la aplicación *Temp module* del instrumento Keithley 6487.

4.1.3.1.1. Controles e indicadores de la aplicación.

La información contenida en el panel frontal se divide en los siguientes bloques:

- **Bloque 0:** identifica la aplicación Temp module del instrumento Keithley 6487.
- **Bloque 1:** botones de control de la aplicación, comunes en todos los programas (ver apartado 3.6.2).
- **Bloque 2:** corresponde al módulo de temperatura. Con los siguientes controles:
 - **TEMP:** selecciona la activación o desactivación del módulo (véase la figura 4.21). Cuando se selecciona *OFF*, no se encuentra visible ningún otro control de este bloque y se despliega un cartel que indica este estado. En este caso, el indicador correspondiente al valor de temperatura, presente en el bloque 5, se encuentra deshabilitado.

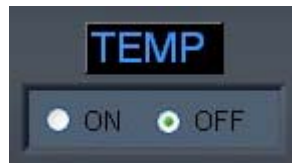


Figura 4.21. Control Temp.

Cuando se selecciona ON, aparecen los controles *Address* y *Lab Temp °C*. Como ya se ha indicado anteriormente, con el control *Address* identificamos la dirección del instrumento Agilent 34401A que va a ser usado para calcular la temperatura. Con el control *Lab Temp °C* introducimos la temperatura de referencia.

- **Bloque 3:** corresponde con el módulo de fuente de salida. Este instrumento, tiene una fuente de voltaje. Las características de esta fuente se explicaron con más detalle en el apartado 2.1.3.2.3 de esta memoria. Presenta los siguientes controles de configuración de la fuente:
 - **SOURCE ON/OFF:** corresponde al control de activación/desactivación de la fuente (véase la figura 4.22). Cuando este control está OFF, la fuente estará apagada. Por el contrario, si el control está ON, la fuente estará encendida cuando comience la secuencia de lectura. El botón de este control tendrá el color rojo, para identificar que la fuente está activada.

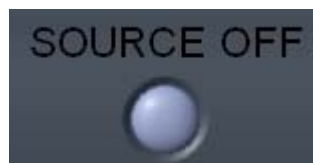


Figura 4.22. Control Source On/Off.

- *SOURCE MODE*: es el control de modo de fuente (véase la figura 4.23). Puesto que la fuente de salida del instrumento Keithley 6487 cuenta con modos de funcionamiento por nivel o rampa, este control permitirá seleccionar un modo u otro.

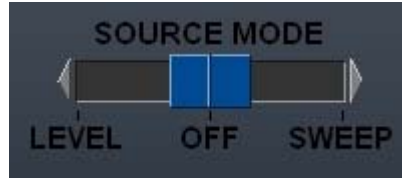


Figura 4.23. Control *Source Mode*.

En el caso de encontrarse en modo OFF, un cartel indicará este estado y la fuente estará apagada, por lo que el control Source ON/OFF estará bloqueado en OFF, permitiendo realizar medidas sin el uso de la fuente (el circuito puede estar excitado por una fuente externa).

Cuando se selecciona *LEVEL* (nivel) o *SWEEP* (rampa) la realización de las medidas deberá ser con la fuente encendida. En este caso, el control source ON/OFF estará bloqueado en ON y se iluminará en rojo. Cuando se termine la secuencia de lectura la fuente se apagará y el control Source volverá al estado OFF, iluminándose gris.

Al seleccionar el modo *LEVEL* aparecerá visible el control *LEVEL (V)* (véase la figura 4.24). En el caso de no estar seleccionado este modo este control no se encontrará visible.



Figura 4.24. Control *LEVEL (V)*.

Cuando el control *Source mode* está en el modo SWEEP aparecerán visibles los controles: *Start (V)*, *Stop (V)*, *Step (V)* y *Delay (s)* (véase la figura 4.25). Estos controles fijan el comienzo, fin, paso y retraso entre puntos, respectivamente, de la rampa. En el caso de no estar seleccionado este modo no se encontrarán visibles.



Figura 4.25. Controles *Start*, *Stop*, *Step* y *Delay*.

- *Range*: con este control se fija el valor del rango de valores hasta los que la fuente de voltaje puede funcionar (véase la figura 4.26).



Figura 4.26. Control *Range*.

- *Limit*: con este control se limita el valor de la corriente que la fuente entrega para el rango de voltaje seleccionado (véase la figura 4.27).



Figura 4.27. Control *Limit*.

- **Bloque 4:** corresponde con los controles para la configuración del instrumento y de la medida.

- *Control de selección de la función de medida*: permite seleccionar la función a medir. Cuando la función de medida es seleccionada, su botón verde permanece iluminado. La otra función no seleccionada permanece inactiva. Para cambiar entre ambas, basta con pulsar el botón verde situado a la derecha de cada una de ellas.

Las medidas que están permitidas en el picoamperímetro son las de corriente (I) y de resistencia (R) (véase la figura 4.28). La conexión que se debe utilizar con el instrumento para realizar las distintas funciones de medidas se explicó detalladamente en el apartado 2.1.3.2.3 de esta memoria.

En este instrumento sólo se podrá seleccionar medidas de R cuando la fuente está activa. Por lo tanto, si se es seleccionado este tipo de medidas y la fuente no está activa (OFF), se forzará para que lo esté, dejando el modo OFF y pasando a LEVEL (nivel). También se puede seleccionar SWEEP (rampa). Con corriente están permitidos los tres casos de modos de fuente de salida (LEVEL, OFF y SWEEP).



Figura 4.28. Control de selección de la función de medida.

- *AUTO Res & Rango*: cuando el botón verde está encendido (véase la figura 4.29), significa que la resolución y el rango de medida se encuentran en modo auto. Si se pulsa el botón, se apaga, mostrándose los controles Resolution y Range, que permiten establecer manualmente los valores para resolución y rango

respectivamente. Estas especificaciones fueron descritas en el apartado 2.1.3.2.3 de esta memoria con mayor detalle.



Figura 4.29. Control AUTO Res & Rango.

- *Filters*: permite seleccionar los filtros que permite el instrumento de manera independiente (véase la figura 4.30). Es decir, que se pueden activar o desactivar cada filtro independientemente del valor de los demás. El instrumento Keithley 6487 presenta los siguientes filtros: average, median y damping. Average y median son utilizados para reducir el ruido en la medida causado por señales de ruido de entrada. Damping es utilizado para reducir el ruido causado por las capacidades parásitas de entrada. La medida no se mostrará hasta que las operaciones de filtrado seleccionadas se hayan completado.



Figura 4.30. Control *Filters*.

- *Rate*: permite modificar el tiempo de integración entre varias posibilidades (véase la figura 4.31). El tiempo de integración afecta a la velocidad de las medidas. Para medidas más rápidas, se debe utilizar un tiempo de integración más corto.



Figura 4.31. Control *Rate*.

En este bloque se fija el número de muestras a tomar (control *Samples*) y el retraso de software introducido (control *Delay*). Con el control *Setup* se los comandos de configuración al instrumento. El control display está también presente en este bloque y permitirá que la pantalla se apague o permanezca encendida.

- **Bloque 5:** corresponde con el bloque de los indicadores o de salida de los resultados de las medidas. Cuenta con la gráfica y el valor de la medida, además del valor de temperatura obtenida para cada medida (en el caso de estar activo el módulo de temperatura).

4.1.3.2. Aplicación Temp only.

Esta aplicación nos permite realizar medidas de temperatura a través del uso de uno de los dos instrumentos Keithley 34401A presentes. La figura 4.32 muestra la pantalla de presentación de esta aplicación.

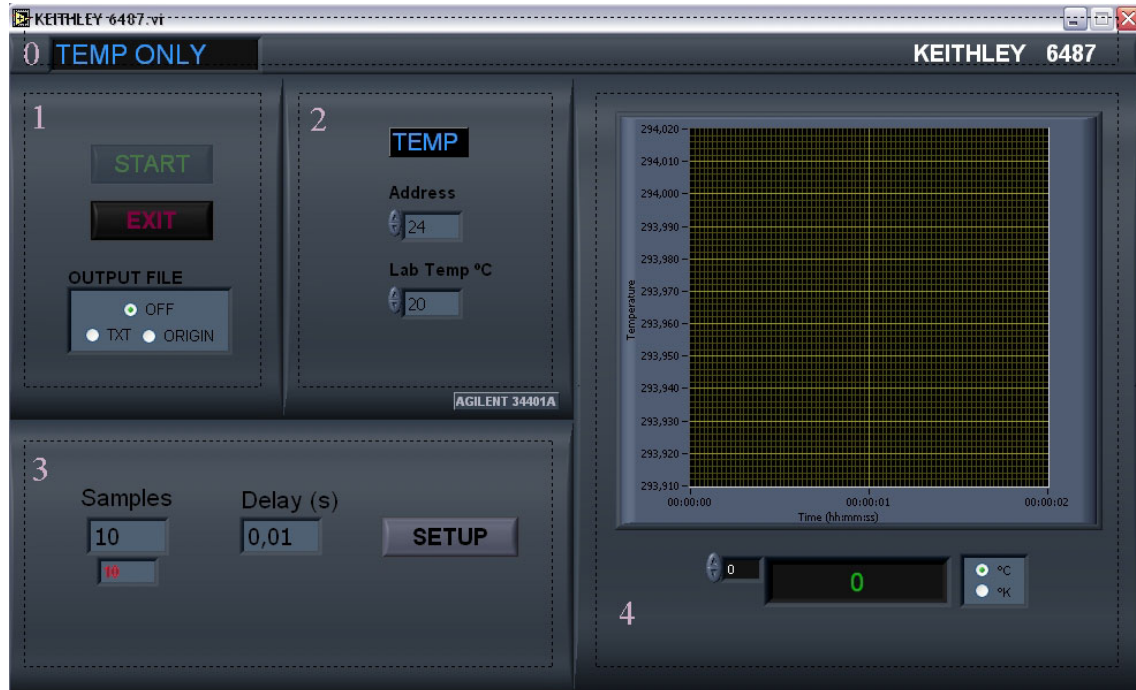


Figura 4.32. Panel frontal de la aplicación Temp only del instrumento Keithley 6487.

Tanto el uso de los controles como de los indicadores presentes en este panel de control han sido descritos en el apartado anterior y en el apartado 3.6 del panel frontal básico, común a todos los programas. Se recuerda la función de sus bloques:

- **Bloque 0:** identifica la aplicación Temp only del instrumento Keithley 6487.
- **Bloque 1:** botones de control de la aplicación, comunes en todos los programas (ver apartado 3.6.2).
- **Bloque 2:** corresponde con la función de temperatura de la aplicación, donde se selecciona la dirección del instrumento empleado y se introduce la temperatura del laboratorio para ser usada como referencia en la obtenida por el termopar tipo K.
- **Bloque 3:** corresponde con la configuración del instrumento y la medida. Se fija el número de muestras a tomar y el retraso de software introducido. Con el control *Setup* se envían los comandos de configuración al instrumento y se fija que el instrumento realice la función de medida de voltaje en CC.
- **Bloque 4:** corresponde con el bloque de los indicadores o de salida de los resultados de las medidas. Cuenta con la gráfica (temperatura en función de tiempo) y valor de la medida de temperatura. Se dispone de un control de selección de unidades para mostrar los valores en °C o K.

4.1.4. Electrómetro Keithley 6517A.

El programa desarrollado en la plataforma de programación LabView para el instrumento de medida Keithley 6517A dispone de tres aplicaciones específicas: *Temp module*, *Temp only* y *Applications*. A continuación se describen las funcionalidades de las tres. En el apartado 3.6, correspondiente al panel frontal básico, se explican los elementos comunes a todos los programas. En los siguientes apartados, se explicarán con detalle los controles e indicadores específicos de cada aplicación.

Las especificaciones técnicas de este instrumento y el tipo de conexión a seguir en función de la medida que se va a realizar están recogidos en los apartados 2.1.3.2.4 y 2.1.3.3.4 respectivamente.

4.1.4.1. Aplicación *Temp module*.

Esta aplicación nos permite realizar todas las medidas eléctricas accesibles en el instrumento Keithley 6517A. Además, añade un módulo (*TEMP*) que proporciona, si se activa, la medida de temperatura para cada medida realizada por el instrumento. La figura 4.33 muestra la pantalla de presentación de esta aplicación.



Figura 4.33. Panel frontal de la aplicación Temp module del instrumento Keithley 6517A.

4.1.4.1.1. Controles e indicadores de la aplicación.

La información contenida en el panel frontal se divide en los siguientes bloques:

- **Bloque 0:** identifica la aplicación Temp module del instrumento Keithley 6517A.
- **Bloque 1:** botones de control de la aplicación, comunes en todos los programas (ver apartado 3.6.2).
- **Bloque 2:** corresponde al módulo de temperatura. Con los siguientes controles:
 - **TEMP:** en el caso del instrumento Keithley 6517A, éste integra su propio conversor interno para termopares tipo K, por lo que en este caso, la medida de temperatura siempre será registrada (véase la figura 4.34). Por lo tanto, este control permitirá elegir entre 6517A, si se toma la propia medida de temperatura proporcionada por el instrumento, o bien, 34401A si se realiza el uso del multímetro.

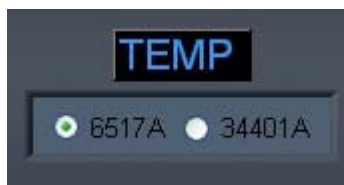


Figura 4.34. Control Temp.

El control *Lab Temp* °C estará en este caso siempre visible. El control *Address* será visible únicamente cuando desde el control Temp se escoga la opción 34401A. El control Address identifica la dirección del instrumento Agilent 34401A que va a ser usado para medir la temperatura. Con el control *Lab Temp* °C introducimos la temperatura de referencia.

- **Bloque 3:** corresponde con el módulo de fuente de salida. Este instrumento, dispone de una fuente de voltaje. Las características de esta fuente se explicaron con más detalle en el apartado 2.1.3.2.4 de esta memoria. Presenta los controles de configuración de la salida:
 - **SOURCE ON/OFF:** corresponde al control de activación/desactivación de la fuente (véase la figura 4.35). Cuando este control está OFF, la fuente estará apagado. Por el contrario, si el control está ON, la fuente estará encendida cuando comience la secuencia de lectura. El botón de este control tendrá el color rojo.



Figura 4.35. Control Source On/Off.

- **SOURCE MODE:** es el control de modo de fuente (véase la figura 4.36). Puesto que la fuente de salida del instrumento Keithley 6517A cuenta con modos de funcionamiento por nivel o rampa, este control permitirá seleccionar un modo u otro.

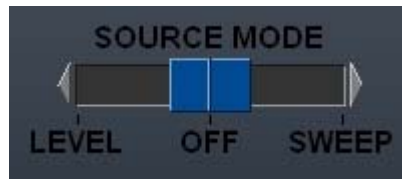


Figura 4.36. Control *Source Mode*.

En el caso de encontrarse en modo OFF, un cartel indicará este estado y la fuente estará apagada, por lo que el control Source ON/OFF estará bloqueado en OFF. Se podrán realizar medidas sin el uso de la fuente.

Sin embargo, cuando el modo está en LEVEL (nivel), hay funciones de medida que permiten encender/apagar la fuente y otras funciones que directamente sólo permiten ser usadas con ella encendida. Se explicará con más detalle en el control de selección de función de medida. Cuando el control source ON/OFF esté en ON su botón se iluminará en rojo y cuando esté en OFF, estará en gris.

Cuando el modo está en SWEEP (rampa), la realización de las medidas deberá ser con la fuente encendida por lo que el control Source estará ON y con su botón en rojo.

Cuando se termine cualquier secuencia de lectura en la medida a realizar en la medida a realizar la fuente se apagará y el control Source volverá a OFF, iluminándose gris.

Al seleccionar el modo LEVEL aparecerá visible el control LEVEL (V) (véase la figura 4.373). En el caso de no estar seleccionado este modo no se encontrará visible.



Figura 4.37. Control *LEVEL (V)*.

Cuando el control Source mode pasa al modo SWEEP (rampa) aparecerán visible los controles: *Start (V)*, *Stop (V)*, *Step (V)* y *Delay (s)* (véase la figura 4.38). Estos controles fijan el comienzo, fin, paso y retraso entre puntos, respectivamente, de la rampa. En el caso de no estar seleccionado este modo no se encontrarán visibles.



Figura 4.38. Controles *Start*, *Stop*, *Step* y *Delay*.

- *Range*: con este control se fija el valor del rango de valores hasta los que esta fuente de voltaje puede funcionar (véase la figura 4.39).

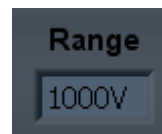


Figura 4.39. Control *Range*.

- *R-Limit*: con este control se limita el valor de la corriente que la fuente puede entregar a través del uso de una resistencia (véase la figura 4.40). Cuando se selecciona, una resistencia de 20 MΩ es colocada en serie con la salida más positiva de la fuente, limitando la corriente para el rango de voltaje seleccionado.



Figura 4.40. Control *R-Limit*.

- *Limit (V)*: con este control se fija el valor de tensión límite que la fuente de voltaje puede proporcionar (véase la figura 4.41).

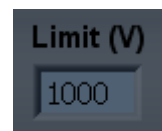


Figura 4.41. Control *Limit*.

- *Meter-Connect*: al activar este control (véase la figura 4.42), el terminal de menor potencial de la fuente de salida es unido internamente con el terminal de menor potencial de la sonda del instrumento. De este modo, la medida debe realizarse con la fuente encendida y conectando la muestra en un extremo al terminal de mayor potencial de la fuente y el otro extremo, al terminal positivo de la sonda. Este control será visible para medidas de voltaje y corriente y siempre y cuando la fuente esté activada (modos LEVEL y SWEEP). En este caso, se podrá optar a activar o no este control. Si este control no está activado, la fuente utiliza su conexión básica, conectando el DUT a los terminales HI y LO de la fuente.

En los casos de medida de resistencia, resistividad y carga, la fuente siempre se encuentra encendida y el meter-connect activado,

por lo que no se visualizará este control, dado que en estos casos siempre estará ON.



Figura 4.42. Control *Meter-connect*

- *ZeroCheck, REL, Zcor*: en la medida de carga (Q) es posible activar y desactivar las funciones ZeroCheck, Rel y Zcor del instrumento para una correcta medida (véase la figura 4.43). En el apartado 2.5.1 de esta memoria se explicó el modo de realizar lecturas de carga.



Figura 4.43. Controles *ZeroCheck, REL* y *Zcor*.

- **Bloque 4:** corresponde con los controles para la configuración del instrumento y de la medida.

- *Control de selección de la función de medida*: permite seleccionar la función a medir (véase la figura 4.44). Cuando la función de medida está activa, su botón verde permanece iluminado. Las otras funciones no seleccionadas permanecen inactivas. Para cambiar entre ellas, basta con pulsar el botón verde situado debajo del nombre de la función, pasando la nueva a ser activada y se desactiva la otra.

Las medidas que están permitidas en el electrómetro son las de voltaje (V), corriente (I), resistencia (R), resistividad (ρ) y carga (Q). La conexión que se debe utilizar con el instrumento para realizar las distintas funciones de medidas se explicó detalladamente en el apartado 2.1.3.3.4 de esta memoria.

Las medidas de carga y resistencia o resistividad en modo AUTO sólo permiten el modo LEVEL con la fuente activada.



Figura 4.44. Control de selección de la función de medida.

- *Resolution*: permite fijar la resolución que empleará el instrumento al realizar sus medidas (véase la figura 4.45). Se puede seleccionar la resolución auto o seleccionar directamente escogiendo entre los valores: $3\frac{1}{2}$, $4\frac{1}{2}$, $5\frac{1}{2}$ y $6\frac{1}{2}$.



Figura 4.45. Control Resolution.

- Range: permite fijar el rango de medida (véase la figura 4.46). Se puede seleccionar auto rango o un rango manual del desplegable. Los rangos de funcionamiento quedaron descritos con detalle en el apartado 2.1.3.2.4 de esta memoria.



Figura 4.46. Control Range.

- *Filters*: se pueden seleccionar los filtros que permite el instrumento de manera independiente (véase la figura 4.47). Es decir, que se pueden activar o desactivar cada filtro independientemente del valor de los demás. El instrumento Keithley 6517A presenta los siguientes filtros: average y median. Son utilizados para reducir el ruido en la medida causado por señales de ruido de entrada.

○



Figura 4.47. Control *Filters*.

- *Rate*: permite modificar el tiempo de integración entre varias posibilidades (véase la figura 4.48). El tiempo de integración afecta a la velocidad de las medidas. Para medidas más rápidas, se debe utilizar un tiempo de integración más corto.

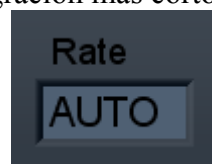


Figura 4.48. Control *Rate*.

- *Guard shield*: este control está disponible con las medidas de corriente, resistencia y resistividad (véase la figura 4.49). Permite habilitar la guarda en la realización de medidas. Este tipo de conexión se explicó con detalle en el apartado 2.1.3.3.4 de esta memoria.



Figura 4.49. Control *Guard shield*.

- *Man/Auto*: únicamente cuando se realizan medidas de resistencia o resistividad, ésta puede realizarse en modo AUTO o en modo MANUAL (véase la figura 4.50). En modo AUTO es el instrumento el que impone una tensión de nivel de valor 40V ó 400V para el cálculo automático de la resistencia. En el modo manual, es el usuario el que introduce el nivel deseado o activa el modo rampa si es necesario. Este control, será visible por tanto, para medidas de resistencia o resistividad.



Figura 4.50. Control *Man/Auto*.

- *Surface/Volume*: cuando se realizan medidas de resistividad existen dos opciones: medida de la resistividad de la superficie o del volumen (véase la figura 4.51). Este tipo de medidas se explicó con detenimiento en el apartado 2.1.4.2.2 de esta memoria.



Figura 4.51. Control *Surface/Volume*.

Este control se encarga de seleccionar entre los dos tipos de medida de resistividad. En función del tipo escogido debemos fijar los siguientes parámetros geométricos (descritos en el apartado 2.1.4.2.2):

- *D1/D2*: se deben fijar estos dos valores cuando se ha seleccionado la medida de resistividad de superficie (véase la figura 4.52).

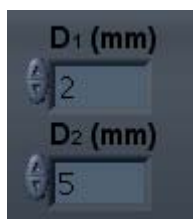


Figura 4.52. Control *D1/D2*.

- *D1/Thickness*: se deben fijar estos dos valores cuando se ha seleccionado la medida de resistividad de volumen (véase la figura 4.53).



Figura 4.53. Control *D1/Thickness*.

En este bloque se fija también el número de muestras a tomar (control *Samples*) y el retraso de software introducido (control *Delay*). Con el control *Setup* se envían los comandos de configuración al instrumento. El control display está también presente en este bloque y permitirá que la pantalla se apague o permanezca encendida.

- **Bloque 5:** corresponde con el bloque de los indicadores o de salida de los resultados de las medidas. Cuenta con la gráfica (en función del tiempo) y el valor de la medida, además del valor de temperatura obtenida para cada medida.

4.1.4.2. Aplicación Temp only.

Esta aplicación nos permite realizar medidas de temperatura a través del uso de uno de los dos instrumentos Keithley 34401A presentes. En la figura 4.54 se puede apreciar la presentación de esta aplicación.



Figura 4.54. Panel frontal de la aplicación Temp only del instrumento Keithley 6517A.

Tanto el uso de los controles como de los indicadores presentes en este panel de control han sido descritos en el apartado anterior y en el apartado 3.6 del panel frontal básico, común a todos los programas. Se recuerda la función de sus bloques:

- **Bloque 0:** identifica la aplicación Temp only del instrumento Keithley 6517A.
- **Bloque 1:** botones de control de la aplicación, comunes en todos los programas (ver apartado 3.6.2).
- **Bloque 2:** corresponde con la función de temperatura de la aplicación, donde se selecciona la dirección del instrumento empleado y se introduce la

temperatura del laboratorio para ser usada como referencia en la obtenida por el termopar tipo K.

- **Bloque 3:** corresponde con la configuración del instrumento y la medida. Se fija el número de muestras a tomar y el retraso de software introducido. Con el control *Setup* se envían los comandos de configuración al instrumento y se fija que el instrumento realice la función de medida de voltaje en CC.
- **Bloque 4:** corresponde con el bloque de los indicadores o de salida de los resultados de las medidas. Cuenta con la gráfica (temperatura en función de tiempo) y valor de la medida de temperatura. Se dispone de un control de selección de unidades para mostrar los valores en °C o K.

4.1.4.3. Aplicación Applications.

Esta aplicación nos permite ejecutar las secuencias de prueba que el instrumento Keithley 6517A tiene registrado en memoria, como se detalló en el apartado 2.1.2.1. Basta con seleccionar la prueba que se pretende realizar, montar el circuito acorde a él e introducir los parámetros específicos para que el propio instrumento ejecute la aplicación y obtener los resultados de la medida. La figura 4.55 muestra la pantalla de presentación de esta aplicación.



Figura 4.55. Panel frontal de la aplicación Applications del instrumento Keithley 6517A.

Las secuencias de prueba van asociadas al uso de la fuente.

Muchos de los controles e indicadores presentes en este panel de control han sido descritos en el apartado anterior y en el apartado 3.6 del panel frontal básico, común a todos los programas. Se recuerda la función de sus bloques y se describen los principales controles.

- **Bloque 0:** identifica la aplicación Applications del instrumento Keithley 6517A.
- **Bloque 1:** botones de control de la aplicación, comunes en todos los programas (ver apartado 3.6.2).
- **Bloque 2:** corresponde con la función de temperatura de la aplicación, donde se selecciona el instrumento empleado y se introduce la temperatura del laboratorio para ser usada como referencia en la obtenida por el termopar tipo K.
- **Bloque 3:** en este bloque está el control del menú de aplicaciones.
 - *Application:* es un menú desplegable (véase figura 4.56) que permite elegir entre varias secuencias de prueba presentes en el instrumento.



Figura 4.56. Control *Application*.

Las secuencias de prueba implementadas en esta aplicación del programa son las siguientes:

- DIODE LEAKAGE-CURRENT
 - CAPACITOR LEAKAGE-CURRENT
 - CABLE INSULATION-RESISTANCE
 - RESISTOR VOLTAGE-COEFFICIENT
 - RESISTANCE SURFACE
 - RESISTANCE VOLUME
 - RESISTANCE ALT-POLARITY
 - SQUARE-WAVE SWEEP
- *Meter-connect:* cuando el resultado de la prueba sea la medida de voltaje o de corriente aparecerá el control Meter-connect para su elección (véase figura 4.57). El resto son medidas de resistencia o resistividad por lo que el Meter-connect estará siempre ON y no será visible.



Figura 4.57. Control *Meter-connect*.

Si el control está activado, el terminal de menor potencial de la fuente de salida es unido internamente con el terminal de menor potencial de la sonda del instrumento. La medida se realiza con la fuente encendida y conectando la muestra en un extremo al terminal de mayor potencial de la fuente y el otro extremo, al terminal positivo de la sonda.

Si este control no está activado, la fuente utiliza su conexión básica, conectando el DUT a los terminales HI y LO de la fuente.

- **Bloque 4:** corresponde con el bloque de los controles que fijan los parámetros de las secuencias de prueba. Según se seleccione una prueba u otra del menú, se despliegan los parámetros específicos de cada prueba.

Cuando el resultado final de la prueba sea la medida de voltaje o de corriente aparecerá el control *Range* (véase la figura 4.58) que permitirá introducir al usuario el rango de medida para un ajuste más fino del valor obtenido.



Figura 4.58. Control Range.

- **Bloque 5:** corresponde con el bloque de los indicadores o de salida de los resultados de las medidas. Cuenta con el valor correspondiente a la medida y su gráfica. También se proporciona el valor de temperatura obtenida para cada medida y su gráfica en función del tiempo.

4.1.5. SourceMeter Keithley 2410.

El programa desarrollado en la plataforma de programación LabView para el instrumento de medida Keithley 2410 dispone de dos aplicaciones específicas: *Temp module* y *Temp discrim*. A continuación se describen las funcionalidades de ambas aplicaciones.

En el apartado 3.6, correspondiente al panel frontal básico, se explican los elementos comunes a todos los programas. En los siguientes apartados, se explicarán con detalle los controles e indicadores específicos de cada aplicación.

Las especificaciones técnicas de este instrumento y el tipo de conexión a seguir en función de la medida que se va a realizar están recogidos en los apartados 2.1.3.2.5 y 2.1.3.3.5 respectivamente.

4.1.5.1. Aplicación *Temp module*.

Esta aplicación nos permite realizar todas las medidas eléctricas accesibles en el instrumento Keithley 2410. Además, añade un módulo (*TEMP*) que proporciona, si se activa, la medida de temperatura para cada medida realizada por el instrumento. La figura 4.59 muestra la pantalla de presentación de esta aplicación.



Figura 4.59. Panel frontal de la aplicación Temp module del instrumento Keithley 2410.

4.1.5.1.1. Controles e indicadores de la aplicación.

La información contenida en el panel frontal se divide en los siguientes bloques:

- **Bloque 0:** identifica la aplicación Temp module del instrumento Keithley 2410.
- **Bloque 1:** botones de control de la aplicación, comunes en todos los programas (ver apartado 3.6.2).
- **Bloque 2:** corresponde al módulo de temperatura. Con los siguientes controles:
 - **TEMP:** selecciona la activación o desactivación del módulo (véase la figura 4.60). Cuando se selecciona *OFF*, no se encuentra visible ningún otro control de este bloque y se despliega un cartel que indica este estado. En este caso, el indicador correspondiente al valor de temperatura, presente en el bloque 5, se encuentra deshabilitado.

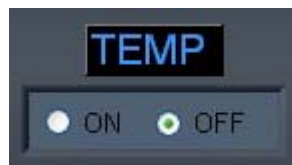


Figura 4.60. Control Temp.

Cuando se selecciona ON, aparecen los controles *Address* y *Lab Temp °C*. Como ya se ha indicado anteriormente, con el control *Address* identificamos la dirección del instrumento Agilent 34401A que va a ser usado para calcular la temperatura. Con el control *Lab Temp °C* introducimos la temperatura de referencia.

- **Bloque 3:** corresponde con el módulo de configuración de la fuente de voltaje o corriente. Las características de esta fuente se explicaron con más detalle en el apartado 2.1.3.2.5 de esta memoria. Presenta los siguientes controles:
 - **FUNCTION:** corresponde al control (véase la figura 4.61) de selección del tipo de fuente que se desea usar para excitar el DUT: fuente de voltaje o fuente de corriente.



Figura 4.61. Control Function.

Los controles *range* y *compliance* (véase la figura 4.62) presentan valores que dependen del tipo de fuente seleccionada (voltaje o

corriente). Estos valores de rango y nivel de compliance están detallados en el apartado 2.1.3.2.5 de esta memoria.



Figura 4.62. Controles Range y Compliance para fuente de voltaje.

- **MODE:** es el control de modo de fuente (véase la figura 4.63). Dado que la fuente de salida del instrumento Keithley 2410 cuenta con los modos de funcionamiento: LEVEL (nivel), SWEEP (barrido de rampa) Y PROG (barrido de rampa programada), este control permitirá seleccionar los modos.

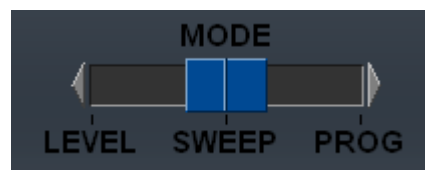


Figura 4.63. Control *Source Mode*.

Al comenzar una secuencia de lectura la fuente se encenderá y se iluminará el indicador Source On presente en el bloque 5 del panel de control. Cuando se termine cualquier secuencia de lectura en la medida a realizar la fuente se apagará y el indicador Source On volverá a su iluminación gris (identificada con apagado).

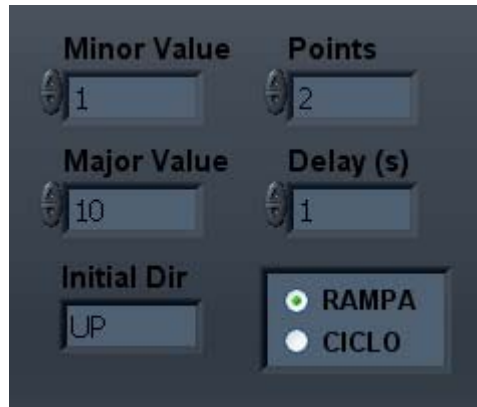
Si el modo LEVEL es seleccionado, aparecerá visible el control *LEVEL (V)* (véase la figura 4.64), si la fuente es de voltaje o el control *LEVEL (A)*, si la fuente es de corriente. En el caso de no estar seleccionado estos modos estarán invisibles.



Figura 4.64. Control *LEVEL (V)*.

Si el modo SWEEP es seleccionado, aparecerán visibles los controles: Minor Value, Major Value, Points, Delay (s), Initial Dir y Rampa/Ciclo (véase la figura 4.65).

Estos controles fijan el valor menor, valor mayor, número de puntos, retraso entre puntos, dirección inicial ascendente o descendente y selección de una única rampa o de un ciclo de rampa de ida y vuelta completo, respectivamente. En el caso de no estar seleccionado este modo estarán invisibles.

Figura 4.65. Controles de parámetros de rampa (*SWEEP*).

Si el modo PROG es seleccionado, el instrumento será configurado para funcionar únicamente como una fuente de tensión programada en rampa por software, apareciendo visibles los controles: Minor Value, Major Value, Points, Delay (s) e Initial Dir (véase la figura 4.66).

Estos controles fijan el valor menor, valor mayor, número de puntos, retraso entre puntos y dirección inicial ascendente o descendente de la fuente de tensión programada, respectivamente. En el caso de no estar seleccionado este modo estarán invisibles.

Figura 4.66. Controles de parámetros de rampa (*PROG*).

Si el modo SWEEP es seleccionado, el instrumento ejecuta la secuencia de prueba, almacenando los valores de las medidas en un registro temporal. Una vez terminada la secuencia, el instrumento vuelca todos los valores medidos y se puede tener acceso a ellos. En el modo PROG, la secuencia es desarrollada por software, por lo que se tiene acceso a cada valor medido inmediatamente, sin necesidad de esperar a terminar la secuencia completa.

- **Bloque 4:** corresponde con los controles para la configuración del instrumento y de la medida.
 - o *Control de selección de la función de medida:* permite seleccionar la función a medir (véase la figura 4.67). Cuando la función de medida está activa, su botón verde permanece iluminado. Las otras funciones

no seleccionadas permanecen inactivas. Para cambiar entre ellas, basta con pulsar el botón verde situado a la derecha del nombre de la función, pasando la nueva función a ser activada, desactivando la anterior.

○

Las medidas que están permitidas en el SourceMeter son las de voltaje (V), corriente (I) y resistencia (R). La conexión que se debe utilizar con el instrumento para realizar las distintas funciones de medidas se explicó detalladamente en el apartado 2.1.3.3.5 de esta memoria.



Figura 4.67. Control de selección de la función de medida.

- *Resolution*: permite fijar la resolución que empleará el instrumento al realizar sus medidas (véase la figura 4.68). Se puede seleccionar la resolución auto o seleccionar directamente escogiendo de los valores: $3\frac{1}{2}$, $4\frac{1}{2}$, $5\frac{1}{2}$ y $6\frac{1}{2}$.



Figura 4.68. Control *Resolution*.

- *Range*: permite fijar el rango de medida (véase la figura 4.69). Se puede seleccionar auto rango o un rango manual del desplegable. Los rangos de funcionamiento quedaron descritos con detalle en el apartado 2.1.3.2.5 de esta memoria. Los rangos son distintos según la selección de la función de medida.

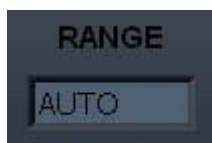


Figura 4.69. Control *Range*.

- *Filter*: se puede activar o desactivar el filtro presente en el instrumento Keithley 2410 (véase la figura 4.70). Se carga el valor por defecto, que es Off. Este filtro es utilizado para reducir el ruido de lectura.



Figura 4.70. Control *Filter*.

- *Rate*: permite modificar el tiempo de integración entre varias posibilidades (véase la figura 4.71). El tiempo de integración afecta a la velocidad de las medidas. Para medidas más rápidas, se debe utilizar un tiempo de integración más corto.



Figura 4.71. Control *Rate*.

- *Cmpl-Range*: este control permite, si esta ON, forzar al rango de medida a seguir al rango de compliance, cuando el auto-rango está apagado (véase la figura 4.72). Es válido para medidas de voltaje y de corriente.



Figura 4.72. Control *Guard shield*.

- *Man/Auto*: únicamente cuando se realizan medidas de resistencia se puede aplicar este control. Ésta puede realizarse en modo AUTO o en modo MANUAL (véase la figura 4.73). En modo AUTO se excita al DUT con una fuente de corriente. En el modo manual, el usuario decide la intensidad de la fuente de corriente o el nivel de voltaje de la fuente de tensión (modo LEVEL). También se puede excitar al DUT con una rampa de voltaje o de corriente (modo SWEEP). También es posible excitar al DUT con una rampa programada de voltaje (modo PROG).



Figura 4.73. Control *Man/Auto*.

- *2-wire/4-wire*: este control permite seleccionar entre medidas a 2 y a 4 puntas (véase la figura 4.74). En el apartado 2.4.2.2 se describe de forma concisa este tipo de medidas.

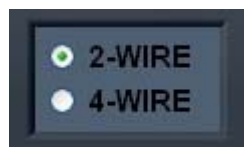


Figura 4.74. Control *2-wire/4-wire*.

En este bloque se fija también el número de muestras a tomar (control *Samples*) y el retraso de software introducido (control *Delay*). Con el control *Setup* se envían los comandos de configuración al instrumento. El control *display* está también presente en este bloque y permitirá que la pantalla se apague o permanezca encendida.

- **Bloque 5:** corresponde con el bloque de los indicadores o de salida de los resultados de las medidas. Cuenta con la gráfica (en función del tiempo) de la medida realizada y su valor. Además del valor de temperatura obtenida para cada medida, en el caso de que el módulo de temperatura se encuentre activado.
 - o *Source ON*: este indicador (véase la figura 4.75) se ilumina cada vez que la fuente del instrumento Keithley 2410 va a ser encendida. Del mismo modo, cuando la fuente se apaga, el indicador deja de lucir.



Figura 4.75. Indicador *Source ON*.

4.1.5.2. Aplicación *Temp discrim.*

Esta aplicación nos permite realizar la excitación eléctrica del DUT y obtener la respuesta eléctrica del mismo cuando se cumplen las condiciones de estabilidad térmica, fijadas por el usuario, en el DUT.

En el apartado 2.6.3.4 se detalla el objetivo y funcionamiento de esta aplicación para el calentamiento del DUT, que combina con la utilización del horno vertical.

La división en partes funcionales de esta aplicación queda fraccionado de la siguiente forma: Los controles se encuentran en la zona izquierda del panel de control y los indicadores se encuentran en la zona derecha del panel. La figura 4.76 muestra la pantalla de presentación de esta aplicación.

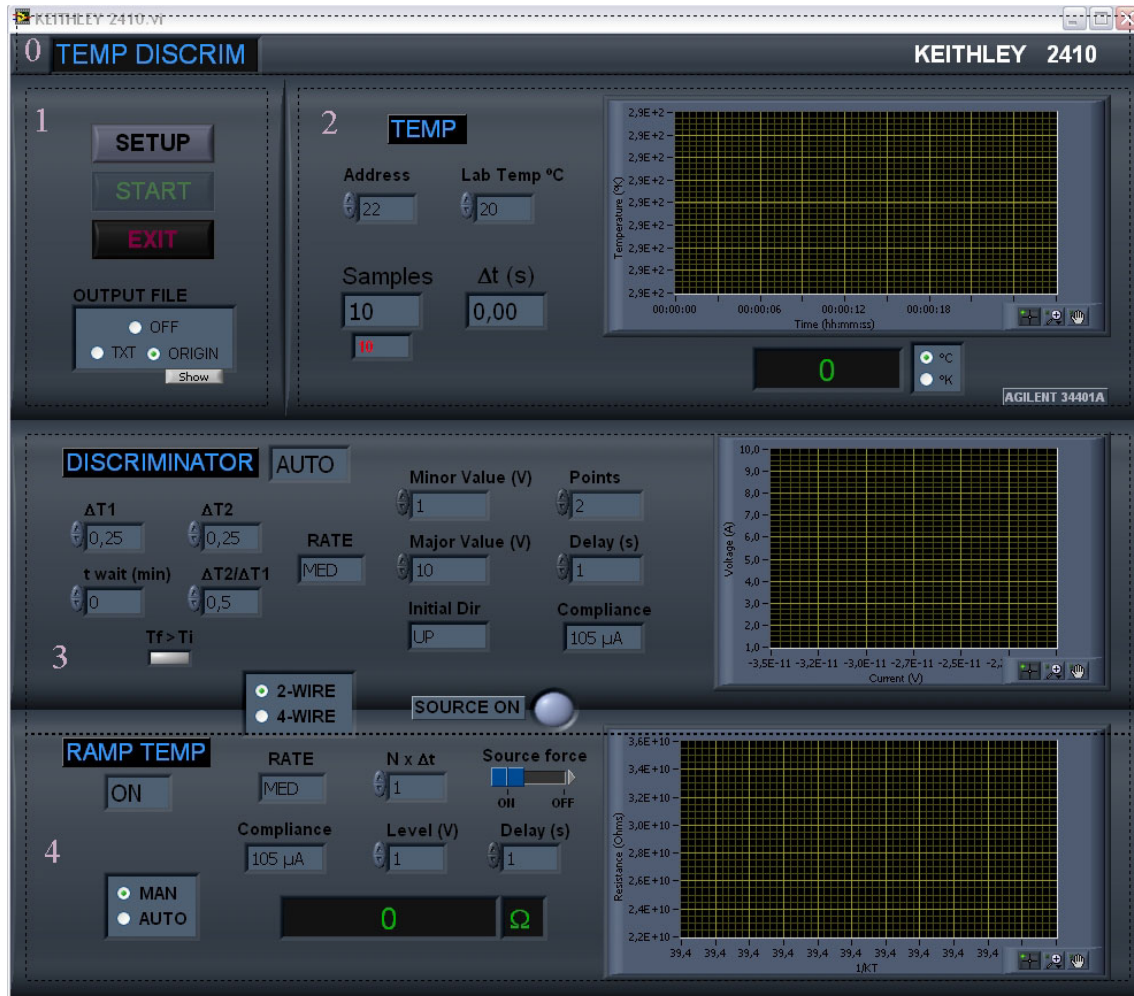


Figura 4.76. Panel frontal de la aplicación Temp discrim del instrumento Keithley 2410.

4.1.5.2.1. Controles e indicadores de la aplicación.

La información contenida en el panel frontal se divide en los siguientes bloques:

- **Bloque 0:** identifica la aplicación Temp discrim del instrumento Keithley 2410.
- **Bloque 1:** botones de control de la aplicación, comunes en todos los programas (ver apartado 3.6.2). El botón *Setup* ha sido trasladado a este bloque únicamente en esta aplicación.
- **Bloque 2:** corresponde al módulo de medición de temperatura (véase figura 4.77). En la parte izquierda se encuentran los controles y en la derecha todos sus indicadores. Este bloque es el que lleva la dirección principal de la operación. Se encarga de medir temperaturas para un número de medidas indicadas en el control *Samples* y con un intervalo de tiempo entre medidas marcado en el control Δt (s). A través del control *Address* fijamos la dirección del multímetro a utilizar. Mediante el valor de *Lab Temp* °C se

introduce la temperatura de referencia para el cálculo final de la temperatura medida.

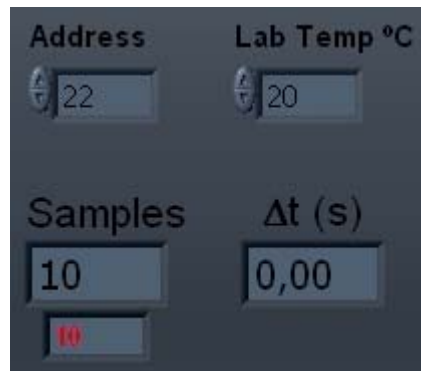


Figura 4.77. Controles del módulo de temperatura de la aplicación Temp discrim.

Los valores obtenidos en la medición se representan mediante una gráfica que muestra la medida obtenida en función del tiempo y un indicador de su valor instantáneo referido a °C o Kelvin.

- **Bloque 3:** corresponde al modulo discriminador (figura 4.78). Este módulo permite el empleo del instrumento Keithley 2410 en modo de rampa de fuente de voltaje con el fin de obtener la curva característica I-V de un DUT. Mediante el control *Discriminator* seleccionamos si es el usuario quien determinará cuando se ejecuta una rampa (opción *USER* de este control) o por el contrario el lanzamiento de la rampa se realice de modo automático sin intervención del usuario (opción *AUTO* de este control) y sólo cuando se alcanza una determinada condición de estabilidad térmica.



Figura 4.78. Control *Discriminator*.

Al seleccionar *User* aparecerá el control *I-V* (véase la figura 4.79) en el panel frontal. De esta forma, será el usuario el que, al pulsar este control, permitirá el comienzo de la ejecución de la rampa cuyos parámetros de configuración aparecen en este mismo bloque.



Figura 4.79. Control *I-V*.

Por el contrario, si en el control *Discriminator* seleccionamos *AUTO*, aparecerán los controles que determinan la ejecución automática de la caracterización I-V cuando se alcanza la condición de estabilidad térmica. Se establecieron los criterios óptimos que gestionasen la ejecución de la rampa. El módulo de temperatura proporcionará constantemente la medida de temperatura que reporta el termopar en el porta-muestras en contacto con el DUT. Se necesitan los 3 últimos valores de medida de temperatura para

saber si se cumplen las condiciones de estabilidad térmica y que permiten que se pueda lanzar la rampa (véase la figura 4.80). Estas condiciones, para tres temperaturas medidas T1, T2 y T3 (con T3 la última medida realizada), son:

- $\Delta T1 = T2 - T1$.
- $\Delta T2 = T3 - T2$.
- $\Delta T2/\Delta T1 = (T3 - T2)/(T2 - T1)$

Estos valores numéricos son introducidos por teclado.

El control $T_f > T_i$ (véase figura 4.80) es equivalente a $T3 > T1$. Con este control se introduce una condición más restrictiva, al tener que estar en proceso de calentamiento en el horno.

Cuando está activado (iluminado en verde) sólo permite la ejecución de la rampa cuando, cumpliéndose las condiciones anteriores, el último valor medido de temperatura es mayor que el antepenúltimo medido, es decir, sólo cuando la temperatura aumenta. En el caso de estar desactivado (color gris) permite la ejecución de la sin mayor restricción.



Figura 4.80. Controles que fijan las condiciones del discriminador.

En muchas ocasiones, los criterios para el lanzamiento de la rampa se pueden cumplir en varias ocasiones para unas mismas condiciones. Con el fin de evitar realizar rampas repetitivas se implementó el control *t wait (min)*. Este control establece el tiempo mínimo, en minutos, que debe pasar entre el final de la realización de una rampa y el comienzo de la siguiente. Hay que tener en cuenta que este valor nunca puede ser mayor que el tiempo de mantenimiento de temperatura de la programación del horno.

La configuración del instrumento Keithley 2410 (y de la rampa) permite fijar el tiempo de integración entre varias posibilidades a través del control *RATE* y el nivel de *Compliance* referido a la fuente de voltaje (véase la figura 4.81).

Los controles Minor Value (V), Major Value (V), Points, Delay (s) e Initial, fijan el menor valor, mayor valor, número de puntos, retraso entre puntos y dirección inicial ascendente o descendente de la fuente de tensión programada, respectivamente.



Figura 4.81. Controles del instrumento 2410 en el módulo discriminador.

La parte derecha de este bloque queda para la representación gráfica de la última curva I-V (véase la figura 4.82) realizada por el instrumento Keithley 2410.

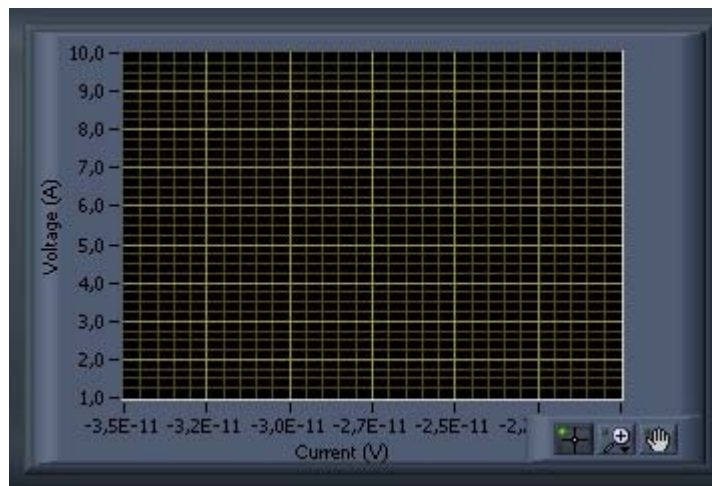


Figura 4.82. Representación gráfica de la curva I-V.

Dado que los bloques 3 y 4 utilizan el instrumento Keithley 2410, el control que permite seleccionar entre medidas a 2 ó 4 puntas y el indicador de encendido de la fuente de salida son comunes a ambos bloques (véase la figura 4.83).



Figura 4.83. Controles 2W/4W y Source on.

- **Bloque 4:** corresponde al módulo *Ramp Temp*. Este módulo se encuentra por defecto apagado (control *Ramp Temp*: *OFF*), por lo que sus controles están invisibles y sus indicadores deshabilitados. Al seleccionar *ON*, se habilitan los indicadores y se muestran todos los controles (véase la figura 4.84). Dado que comparte el control del instrumento 2410, este bloque funcionará siempre y cuando este instrumento no esté realizando una rampa, que se activa por medio del módulo discriminador (bloque 3).

Este módulo permite realizar medidas de resistencia con el instrumento Keithley 2410, tanto en modo manual como en auto a través del control *MAN/AUTO*. Al seleccionar medidas en modo manual, se podrá fijar el valor de *Compliance* y nivel de voltaje (*LEVEL*) asociado a la fuente. Si se seleccionan medidas de resistencia en modo *AUTO* la fuente fijará internamente un valor para su cálculo, por lo que el control *LEVEL (V)* no estará disponible y el valor de *Compliance* se fijará en auto. Mediante el control *S. Delay (s)* se establece el tiempo de retraso entre el encendido de la fuente y el disparo de la medida. También se permite fijar el tiempo de integración entre varias posibilidades a través del control *RATE*.



Figura 4.84. Controles del módulo *Ramp Temp*.

El control del número de medidas a realizar vendrá determinado por un número de ciclos de Δt (bloque 2). Si $N \times \Delta t$ se fija a 1, se realizarán medidas para todos los puntos en los que el multímetro realiza medidas de temperatura. Si, por ejemplo, se fija a 2, el instrumento Keithley 2410 realizará medidas de resistencia cada dos medias del multímetro y así sucesivamente.

Mediante el control *Source Force*, es posible forzar a que el instrumento Keithley 2410 tenga encendida la fuente en todo momento (*ON*). Si por el contrario se selecciona *OFF*, el instrumento sólo encenderá la fuente en el momento en el que vaya a realizar la excitación y la respuesta del DUT, después de expirar el tiempo *S. Delay*.

La medida obtenida será visualizada con su valor en Ω . Estará presente una representación gráfica del valor de resistencia obtenido en función de $1/KT$, donde K es la constante de Boltzman ($8,617 \cdot 10^{-5}$ eV/K) y T la temperatura medida en ese valor de resistencia.

4.2. Programa específico.

4.2.1. SourceMeter, electrómetro y picoamperímetro. Keithley 2410, 6517 y 6487.

El programa desarrollado en la plataforma de programación LabView para los instrumentos de medida Keithley 2410, 6517A y 6487 bajo un mismo panel de control constituye una aplicación en sí misma (*Temp module*). El instrumento Keithley 2410 funcionará como fuente de tensión o de corriente. El instrumento Keithley 6517A está configurado en modo de lectura de voltaje. El instrumento Keithley 6487 está configurado en modo de lectura de corriente. Se decidió utilizar esta configuración con el fin de mejorar la resolución de las medidas de tensión y de corriente respecto a las que nos proporcionaba el SourceMeter Keithley 2410. La fuente utilizada es la del Keithley 2410 puesto que es la de mayores prestaciones.

En el apartado 3.6, correspondiente al panel frontal básico, se explican los elementos comunes a todos los programas. En los siguientes apartados, se explicarán con detalle los controles e indicadores específicos de cada aplicación.

4.2.1.1. Aplicación *Temp module*.

La aplicación permite emplear tres instrumentos Keithley: 2410, 6517A y 6487 para caracterizar un DUT. Además, añade un módulo (*TEMP*) que proporciona, si se activa, la medida de temperatura para cada ciclo de medida realizada por los instrumentos. La figura 4.85 muestra la pantalla de presentación de esta aplicación.



Figura 4.85. Panel frontal Temp module de los instrumentos K. 2410-6517A-6487.

4.2.1.1.1. Controles e indicadores de la aplicación

La información contenida en el panel frontal se divide en los siguientes bloques:

- **Bloque 0:** identifica la aplicación Temp module de los instrumentos Keithley 2410-6517A-6487.
- **Bloque 1:** botones de control de la aplicación, comunes en todos los programas (ver apartado 3.6.2).
- **Bloque 2:** corresponde al módulo de temperatura. Este módulo va asociado al instrumento Agilent 34410A. Se disponen los siguientes controles:
 - **TEMP:** selecciona la activación o desactivación del módulo (véase figura 4.86). Cuando se selecciona *OFF*, no se encuentra visible ningún otro control de este bloque y se despliega un cartel que indica este estado. En este caso, el indicador correspondiente al valor de temperatura, presente en el bloque 7, se encuentra deshabilitado.

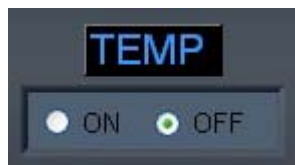


Figura 4.86. Control Temp.

Cuando se selecciona ON, aparecen los controles *Address*, *Lab Temp °C* y *Rate*. Como ya se ha indicado anteriormente, con el control *Address* identificamos la dirección del instrumento Agilent 34401A que va a ser usado para calcular la temperatura. Con el control *Lab Temp °C* introducimos la temperatura de referencia. Con el control *Rate* (véase figura 4.87) podemos modificar el tiempo de integración de este instrumento.



Figura 4.87. Control Rate.

- **Bloque 3:** corresponde con el módulo de fuente (figura 4.88). Este módulo va asociado al instrumento Keithley 2410. La aplicación presenta la posibilidad de usar la fuente (de tensión o corriente) disponible en el instrumento Keithley 2410 o bien utilizar otra fuente externa. Esta elección se realiza mediante el control *Source* presente en este bloque. Cuando se selecciona *Ke 2410* en este control, se utilizará la fuente del instrumento Keithley 2410 y se desplegarán todos los controles necesarios para la configuración del instrumento y de la medida. Por el contrario, si se selecciona *External* el instrumento 2410 no estará disponible, ya que se presupone el uso de una fuente externa. En este caso, el módulo carecerá de controles.



Figura 4.88. Control Source.

Al seleccionar Ke 2410 estarán presentes los siguientes controles:

- *FUNCTION*: corresponde al control de selección del tipo de fuente con la que se excitará al DUT al realizar la secuencia de medidas (véase figura 4.89). Existen dos posibilidades: fuente de corriente y fuente de tensión.

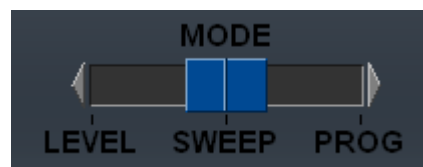
Figura 4.89. Control *Function*.

Los controles *range* y *compliance* (véase figura 4.90) presentan valores que dependen del tipo de fuente seleccionada (voltaje o corriente). Los valores de rango y nivel de compliance están detallados en el apartado 2.1.3.2.5 de esta memoria.



Figura 4.90. Controles Range y Compliance para fuente de voltaje.

- *MODE*: es el control de modo de fuente (véase la figura 4.91). Dado que la fuente de salida del instrumento Keithley 2410 cuenta con los modos de funcionamiento: LEVEL (nivel), SWEEP (barrido de rampa) Y PROG (barrido de rampa programada), este control permitirá seleccionar los modos.

Figura 4.91. Control *Source Mode*.

Al comenzar una secuencia de lectura la fuente se encenderá y se iluminará el indicador Source On presente en el bloque 7 de este panel de control. Cuando se termine cualquier secuencia de lectura en

la medida a realizar la fuente se apagará y el indicador Source On volverá a su iluminación gris (identificada con apagado).

Si el modo LEVEL es seleccionado, aparecerá visible el control *LEVEL (V)* (véase la figura 4.92), si la fuente es de voltaje o el control *LEVEL (A)*, si la fuente es de corriente. En el caso de no estar seleccionado estos modos estarán invisibles.



Figura 4.92. Control *LEVEL (V)*.

Si el modo SWEEP es seleccionado, aparecerán visibles los controles: Minor Value, Major Value, Points, Delay (s), Initial Dir y Rampa/Ciclo (véase la figura 4.93).

Estos controles fijan el valor menor, valor mayor, número de puntos, retraso entre puntos, dirección inicial ascendente o descendente y selección de una única rampa o de un ciclo de rampa de ida y vuelta completo, respectivamente. En el caso de no estar seleccionado este modo estarán invisibles.



Figura 4.93. Controles de parámetros de rampa (*SWEEP*).

Si el modo PROG es seleccionado, el instrumento será configurado para funcionar únicamente como una fuente de tensión programada en rampa por software, apareciendo visibles los controles: Minor Value, Major Value, Points, Delay (s) e Initial Dir (véase la figura 4.94).

Estos controles fijan el valor menor, valor mayor, número de puntos, retraso entre puntos y dirección inicial ascendente o descendente de la fuente de tensión programada, respectivamente. En el caso de no estar seleccionado este modo estarán invisibles.

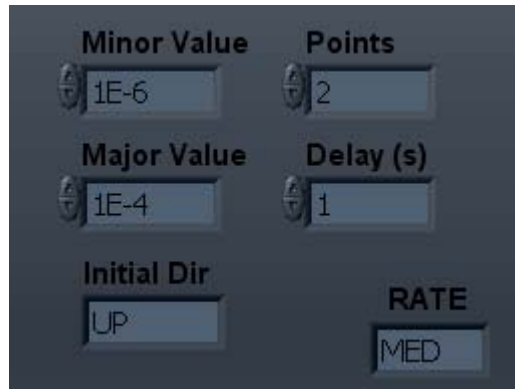


Figura 4.94. Controles de parámetros de rampa (*Prog*).

- **Bloque 4:** corresponde con el módulo de medida de voltaje. Este módulo va asociado al electrómetro Keithley 6517A. Esta aplicación presenta la posibilidad de realizar medidas de voltaje con el instrumento Keithley 6517A. Mediante el uso del control *Volt* (véase la figura 4.95), podemos seleccionar si se va a realizar esta medida. Cuando el control está ON, está habilitado la medida de voltaje y se desplegarán todos los controles necesarios para la configuración del instrumento y de la medida. Por el contrario, si está OFF, el módulo carecerá de otros controles y no se realizarán medidas de voltaje.



Figura 4.95. Control VOLT.

Al estar en ON, quedan visibles los siguientes controles:

- *Resolution:* permite fijar la resolución que empleará el instrumento al realizar sus medidas (véase la figura 4.96). Se puede seleccionar la resolución auto o bien seleccionar directamente escogiendo entre los valores: 3 ½, 4 ½, 5 ½ y 6½.
- *Range:* permite fijar el rango de medida (véase la figura 4.96). Se puede seleccionar auto rango o un rango manual del desplegable. Los rangos de funcionamiento para este instrumento quedaron descritos con detalle en el apartado 2.1.3.2.5 de esta memoria.



Figura 4.96. Controles Resolution y Range.

- *Filters:* se pueden seleccionar los filtros que permite el instrumento de manera independiente (véase la figura 4.97). Es decir, que se pueden activar o desactivar cada filtro independientemente del valor

de los demás. El instrumento Keithley 6517A presenta los siguientes filtros: average y median.

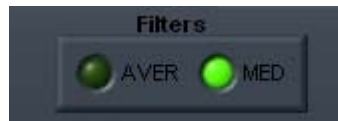


Figura 4.97. Control *Filter*.

- *Rate*: Permite modificar el tiempo de integración entre varias posibilidades (véase la figura 4.98). El tiempo de integración afecta a la velocidad de las medidas. Para medidas más rápidas, se debe utilizar un tiempo de integración más corto.



Figura 4.98. Control *Rate*.

- **Bloque 5:** corresponde con el módulo de medida de corriente. Este módulo va asociado al picoamperímetro Keithley 6487 (véase la figura 4.99). Esta aplicación presenta la posibilidad de realizar medidas de corriente con el instrumento Keithley 6487. Mediante el uso del control *Curr*, podemos seleccionar si se va a realizar esta medida. Cuando el control está ON, está habilitado la medida de corriente y se desplegarán todos los controles necesarios para la configuración del instrumento y de la medida. Por el contrario, si está OFF, el módulo carecerá de otros controles y no se realizarán medidas de voltaje.



Figura 4.99. Control CURR.

Al estar en ON, quedan visibles los siguientes controles:

- *Resolution*: permite fijar la resolución que empleará el instrumento al realizar sus medidas (véase la figura 4.100). Se puede seleccionar la resolución auto o bien seleccionar directamente escogiendo entre los valores: 3 ½, 4 ½, 5 ½ y 6½.
- *Range*: permite fijar el rango de medida. Se puede seleccionar auto rango o un rango manual del desplegable (véase la figura 4.100). Los rangos de funcionamiento para este instrumento quedaron descritos con detalle en el apartado 2.1.3.2.5 de esta memoria.



Figura 4.100. Controles Resolution y Range.

- *Filters*: permite seleccionar los filtros que permite el instrumento de manera independiente (véase la figura 4.101). Es decir, que se pueden activar o desactivar cada filtro independientemente del valor de los demás. El instrumento Keithley 6487 presenta los siguientes filtros: average, median y damping. Average y median son utilizados para reducir el ruido en la medida causado por señales de ruido de entrada. Damping es utilizado para reducir el ruido causado por las capacidades parásitas de entrada. La medida no se mostrará hasta que las operaciones de filtrado seleccionadas se hayan completado.

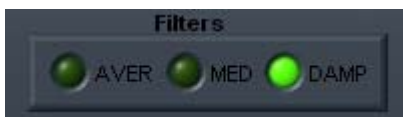


Figura 4.101. Control *Filter*.

- *Rate*: permite modificar el tiempo de integración entre varias posibilidades (véase la figura 4.102). El tiempo de integración afecta a la velocidad de las medidas. Para medidas más rápidas, se debe utilizar un tiempo de integración más corto.



Figura 4.102. Control *Rate*.

Los bloques 3, 4 y 5 presentan un control en común: Trig Out (véase la figura 4.103). Este control está colocado en un punto común a los bloques puesto que afecta a la configuración de los tres instrumentos presentes en esta aplicación.

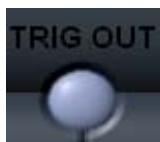


Figura 4.103. Control *Trig Out*.

Cuando está desactivado, el control Trig Out no estará iluminado. En este caso, al comenzar la secuencia de medida, los tres instrumentos realizarán el disparo de medida de forma interna e inmediata, siendo el disparo independiente entre los instrumentos.

Por el contrario, cuando el control está activado se iluminará en color verde. Al llegar a la secuencia de lectura, el instrumento 2410 estará configurado para mandar la señal (pulso TTL) de disparo de lectura a los otros dos instrumentos (6517A y 6487). Por lo tanto, estos dos instrumentos, el electrómetro y el picoamperímetro, tendrán un disparo externo que será proporcionado por el SourceMeter. Esta opción requiere que los conectores T-link de los tres instrumentos estén conectados entre sí correctamente. Se puede consultar, en el apartado 2.1.3.3.5, la conexión necesaria para realizar esta configuración.

- **Bloque 6:** este bloque permite la activación/desactivación de los controles de pantalla de los instrumentos. Cuando el control *Displays* (véase la figura 4.104) presenta la selección *DES*, todos los controles de pantalla no se encuentran disponibles. Por el contrario, cuando está seleccionado *ACT*, los controles de pantalla de los cuatro instrumentos utilizados en esta aplicación estarán visibles.

Figura 4.104. Control *Displays*.

Todos los controles de pantalla de los instrumentos que se encuentran en color verde indican que los monitores de los instrumentos están habilitados (véase la figura 4.105). Cuando el control de pantalla de algún instrumento se encuentra seleccionado en negro, el instrumento correspondiente pasará a tener la pantalla deshabilitada (oscurecida completamente o indicado en pantalla según el instrumento) después de pulsar el botón *Setup* y enviar los comandos de configuración correspondientes.

Cuando un instrumento está con la pantalla deshabilitada puede operar con mayor rapidez.

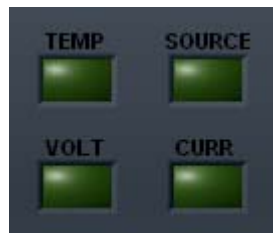


Figura 4.105. Controles de pantalla de los instrumentos.

- **Bloque 7:** corresponde con el bloque de los indicadores o de salida de los resultados de las medidas. Cuenta con la gráfica de la medida de voltaje frente a la medida de corriente, conformando la curva característica del DUT. Muestra el valor de temperatura obtenida para cada medida, en el caso de que el módulo de temperatura se encuentre activo. Dispone de un indicador de fuente:
 - o *Source ON:* este indicador se ilumina cada vez que la fuente del instrumento Keithley 2410 va a ser encendida (véase la figura 4.06). Del mismo modo, cuando la fuente se apaga, el indicador deja de lucir.

Figura 4.106. Indicador *Source ON*.

- **Bloque 8:** en este bloque se fija el número de muestras a tomar (control *Samples*) y el retraso de software introducido (control *Delay*). Con el control *Setup* se envían los comandos de configuración a los instrumentos.



5. PORTABILIDAD.
APLICACIONES EXE

5. PORTABILIDAD. APLICACIONES EXE.

El archivo ejecutable (.exe) proporciona una versión definitiva del programa en la que únicamente aparecerá la ventana del panel de control en modo de ejecución. Para hacerlo funcionar basta con introducirse en el directorio de trabajo y lanzar la aplicación .exe correspondiente, como se realizaría para ejecutar cualquier otra aplicación de Windows. Desde el punto de vista de la programación, no es por tanto modificable. El usuario se encuentra con un producto definitivo con una interfaz intuitiva que le permitirá poner en funcionamiento de modo remoto los instrumentos de medida de precisión implementados. El encapsulado en este formato impide que el código se corrompa.

Las propiedades generales de los archivos VIs que formarán parte de nuestro programa ejecutable pueden modificarse dentro de cada archivo. Para ello, seleccionamos el menú *File→VI properties* (Ctrl+I), pudiéndose acceder tanto desde el panel frontal como desde el diagrama de bloques, abriéndose una ventana donde configuramos varios aspectos del VI correspondiente. En este cuadro de diálogo se pueden ver o modificar, entre otros, los siguientes aspectos:

- Editar su icono y revisar el historial del archivo.
- Memoria usada por el VI.
- Opciones de seguridad con clave de acceso.
- Apariencia y tamaño de la ventana. Posición durante la ejecución.
- Opciones de ejecución.

LabVIEW versión 8 permite construir ejecutables (.exe) de los VIs a partir del VI principal y los *subVIs* necesarios para su ejecución. El menú *Tools→Build Executable*, accesible desde el panel frontal y el diagrama de bloques, permite crear el ejecutable. Para ello, se pide crear un proyecto, si anteriormente no se había creado ninguno. Posteriormente se abre una ventana que permite cargar las propiedades del *Build Specifications* para almacenar el ejecutable dentro del proyecto.

El paso anterior es similar a crear primero un nuevo proyecto. Mediante el menú *File→New Project*, accesible desde el panel frontal y el diagrama de bloques, se nos preguntará si queremos agregar nuestros *VIs*, diciéndole que sí. Si decimos que no, posteriormente podremos agregarlos, o agregar más archivos si ya hemos dicho que sí, desplegando el menú raíz del proyecto y pulsando el botón derecho del ratón en *My Computer→Add File*, si queremos añadir un archivo (VI) o *Add Folder* para un directorio de trabajo. Una vez asociados los archivos *VIs* a nuestro proyecto ya es posible crear su ejecutable. Basta con pulsar el botón derecho del ratón en *Build Specifications* del menú raíz del proyecto y seleccionar *New→Application (EXE)*, abriéndose la ventana que permite cargar las propiedades. De este modo se construye la especificación desde el proyecto. En la figura 5.1 puede verse el menú raíz que se genera al crearse un proyecto.

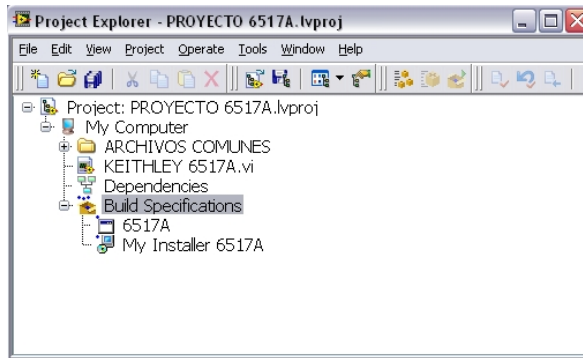


Figura 5.1. Detalle del menú raíz del proyecto 6517A.

A continuación se describen los diferentes apartados de la ventana de configuración del ejecutable:

- *Application Information*: Asignamos el nombre de la aplicación y el directorio de destino donde se creará la aplicación.
- *Source Files*: En *Startup VIs* ponemos el VI principal y en *Dynamic VIs* todos los demás *VIs*. En nuestro caso, el VI principal corresponde con el de cada instrumento de medida y los demás subVIs están metidos en la carpeta *archivos comunes* que es común para todos los instrumentos. La ventana de este apartado se puede ver en la figura 5.2.
- *Destinations*: En *Destination Directory* seleccionamos el directorio donde se creará el path (el mismo directorio seleccionado en el apartado *Application Information*) y en *Support Directory* elegimos la carpeta donde se guardarán las librerías y archivos que necesita la aplicación.
- *Source File Settings*: En *VI Settings* seleccionamos diferentes opciones de configuración para la aplicación que se verán cuando el programa esté funcionando, como que todos los usuarios puedan cerrar la aplicación, que el usuario pueda minimizar la ventana, que la aplicación arranque al abrirse, etc.
- *Advanced*: Corresponde con propiedades avanzadas, dejándose activas las opciones por defecto.
- *Run-Time Languages*: Seleccionamos todos los idiomas para que sean soportados por el programa.
- *Preview*: Al pulsar el botón *Generated Preview* se crea una versión previa de los archivos del ejecutable.

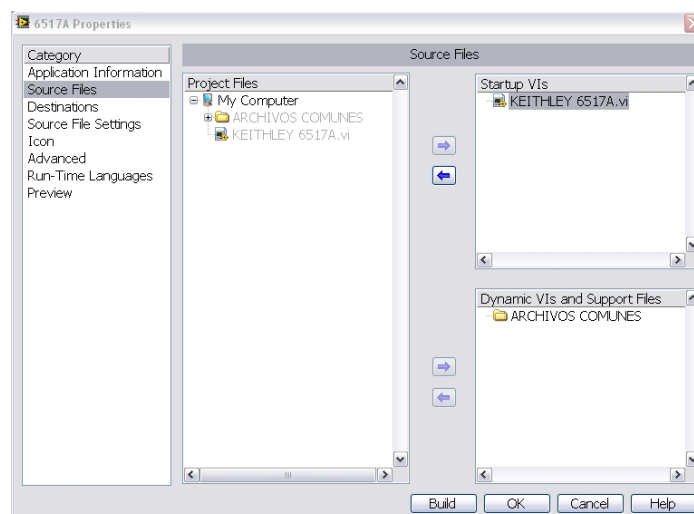


Figura 5.2. Detalle de las propiedades del archivo ejecutable 6517A.exe.

Una vez que hemos editado las propiedades del archivo ejecutable, construiremos el archivo (.exe) pulsando el botón *Build* desde la propia ventana de las propiedades. De este modo, se generará el archivo con extensión .exe y demás archivos necesarios para su ejecución en el directorio especificado. Tendremos, por tanto, un archivo ejecutable para cada uno de los instrumentos de medidas de precisión (programas modulares) presentes en nuestro laboratorio y uno más para ejecutar el programa en el que se combinan tres instrumentos (programa específico). Se debe repetir todo el proceso para cada VI principal. Se generaron los siguientes archivos:

- 6517A.exe (electrómetro)
- 34401A.exe (multímetro)
- 2410.exe (SourceMeter)
- 182.exe (nanovoltímetro)
- 6487.exe (picoamperímetro)
- 2410-6517A-6487.exe (SourceMeter, electrómetro y picoamperímetro)

Cada nombre hace referencia al modelo de instrumento de precisión que utiliza el programa.

Una vez desarrollado el ejecutable, es posible crear a partir de él una aplicación denominada instalador que permite instalarlo en cualquier otro ordenador. Para crear un programa instalador de nuestro archivo ejecutable basta con pulsar el botón derecho del ratón en *Build Specifications* del menú raíz del proyecto y seleccionar *New→Installer*, abriéndose la ventana que permite cargar las propiedades de nuestro instalador.

De este modo se construye nuestro archivo instalador que permite la instalación de su correspondiente archivo ejecutable.

A continuación se describen los diferentes apartados de la ventana de configuración del instalador:

- *Product Information*: Seleccionamos el nombre de la aplicación en función del archivo ejecutable del instrumento que permite instalar. Definimos el idioma y seleccionamos el directorio de destino del instalador.
- *Source Files*: Añadimos al apartado *Destination View* el archivo ejecutable antes creado. La ventana de este apartado se puede ver en la figura 5.3.
- *Source File Settings*: Permite la opción de modificar el atributo de los archivos que van a componer el ejecutable. La opción escogida en este caso, que es la de defecto, deja los archivos con su atributo inicial. Es posible, por ejemplo, que ciertos archivos que no relevantes en la ejecución permanezcan ocultos.
- *Shortcuts*: Permite que el instalador cree accesos directos al ejecutable en la ruta que se especifique.
- *Registry*: Permite la edición en el registro de sistema para almacenar configuraciones y opciones de la aplicación. En nuestro caso, no es necesario su uso.
- *Additional Installers*: Contiene un menú que permite seleccionar instaladores adicionales a la instalación de nuestro propio archivo ejecutable. Se pueden incluir instaladores que cargan librerías para la ejecución de las aplicaciones, drivers del hardware GPIB, bibliotecas de programación, etc. En este caso, dejamos todas las casillas sin seleccionar, dado que únicamente queremos que el instalador contenga nuestro archivo ejecutable.
- *Advanced*: Permite definir otros elementos en la instalación como el sistema operativo requerido, en este caso Windows XP. También existe la posibilidad de lanzar el ejecutable nada más ser instalado, no activado en nuestro caso.

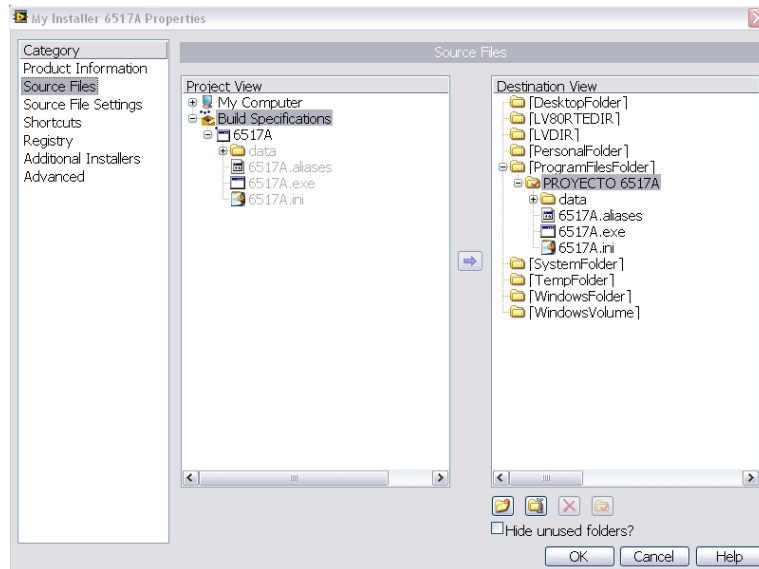


Figura 5.3. Detalle de las propiedades del instalador del ejecutable *6517A.exe*.

Se crearon instaladores para la totalidad de los archivos ejecutables de programas que se habían desarrollado, permitiendo una gran autonomía. Se dotó a todos nuestros programas de portabilidad, pudiendo ser utilizado en cualquier ordenador que no tenga instalado la plataforma de desarrollo LabView.

Una vez que ejecutamos el instalador de la aplicación en un ordenador el archivo ejecutable queda instalado en la ruta especificada. Si el ordenador no tiene el software de LabVIEW instalado en Windows, el programa no funcionará correctamente. Esto ocurre porque nuestro programa necesita que estén cargadas las librerías correspondientes para su ejecución, el driver de la controladora GPIB utilizada (PCI, USB, etc.) del hardware GPIB y las bibliotecas de programación.

Se hace necesario, por tanto, la creación de un nuevo instalador que englobe la carga de todos estos paquetes de software en nuestro PC de destino. En realidad, estos paquetes se podrían haber añadido a cada instalador del ejecutable de cada instrumento de medida, pero con el fin de evitar sobrecargar en exceso su espacio debido a lo mucho que ocupan los instaladores de este software y teniendo en cuenta que los paquetes de software son comunes para todos los programas, se optó por esta solución más eficaz. Así pues, se creará un nuevo instalador que reúna todos los instaladores de software comunes a los programas y que serán necesarios instalar en toda máquina que no posea LabVIEW, justo antes de instalar y lanzar los programas ejecutables.

Los pasos son los mismos que en el caso anterior son la salvedad de las siguientes propiedades:

- *Source Files*: No es necesario añadir al apartado *Destination View* ningún archivo ejecutable puesto que solamente queremos cargar instaladores adicionales.
- *Additional Installers*: Del menú de selección de los instaladores adicionales debemos marcar y por tanto incluir lo siguiente:
 - NI LabVIEW Run-Time Engine 8.0.1
 - NI LabVIEW Run-Time Engine 8.2.1 (librerías para la ejecución)
 - NI-488.2 2.4.6 (drivers del hardware GPIB)

- NI-VISA Runtime 4.1 (bibliotecas de programación)

La ventana correspondiente a este apartado puede apreciarse en la figura 5.4.

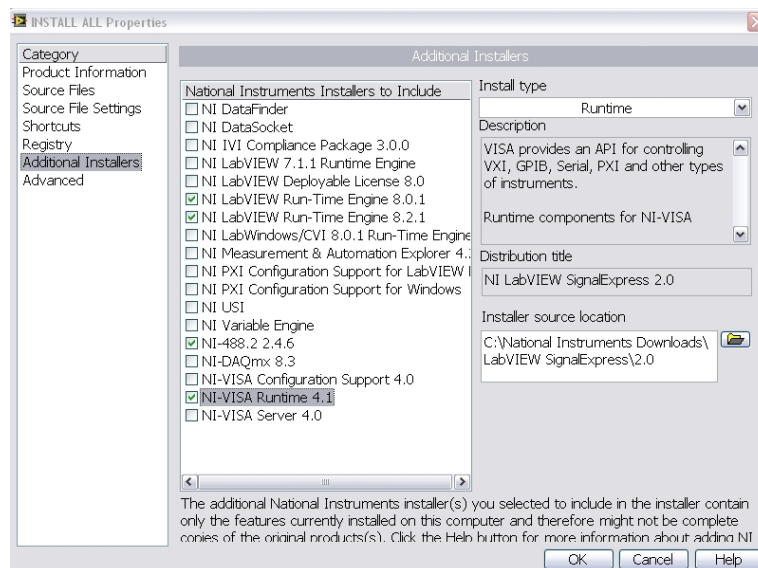


Figura 5.4. Detalle de las propiedades del instalador de software adicional común.

Una vez generado el instalador de software adicional, procedemos a instalarlo en los ordenadores en los que, no teniendo LabVIEW cargado, se pretenda instalar o hacer funcionar algún programa ejecutable.



6. CONCLUSIONES. LÍNEAS
FUTURAS

6. CONCLUSIONES. LÍNEAS FUTURAS.

En este capítulo se describen los resultados más importantes obtenidos en este proyecto de automatización en el entorno de programación LabView de un sistema flexible de instrumentación aplicado a las medidas eléctricas.

La labor fundamental de este proyecto se centra en el estudio, planificación y desarrollo de la programación en instrumentación de precisión.

- Para la realización de este proyecto ha sido necesario:
 - El estudio de los fundamentos de las técnicas de medida de magnitudes eléctricas mediante el uso de instrumentos de alta precisión.
 - El aprendizaje del manejo de los instrumentos de medidas eléctricas cuyo funcionamiento se pretende automatizar: multímetro Agilent 34401A, nanovoltímetro Keithley 182, picoamperímetro Keithley 6487, electrómetro Keithley 6517A y SourceMeter Keithley 2410. También se ha contado con un ordenador de sobremesa y tarjetas GPIB-PCI y GPIB-USB de National Instruments.
 - La adquisición de conocimientos de la plataforma de programación G bajo el entorno gráfico de LabVIEW con el fin de poder desarrollar las especificaciones funcionales de cada aplicación.

Como conclusiones principales de este proyecto se pueden destacar las siguientes:

- Se estudiaron los estándares para medida de alta y baja impedancia, que pueden ser realizados con las aplicaciones de control de los instrumentos de alta precisión desarrolladas en este proyecto.
- Se han desarrollado seis programas:

Cinco de ellos son específicos de cada instrumento de medida. Todos estos programas presentan una aplicación que implementa el funcionamiento general del instrumento. Además, todos presentan una aplicación específica o módulo específico que permite medir temperaturas a través del empleo de un termopar tipo K y un instrumento para la medida de la diferencia de potencial generada en el termopar (ya sea un multímetro o un nanovoltímetro). Estos programas automatizan los instrumentos:

- Multímetro Agilent 34401A.
 - Nanovoltímetro Keithley 182.
 - Picoamperímetro Keithley 6487.
 - Electrómetro Keithley 6517A.
 - SourceMeter Keithley 2410
- La alta funcionalidad de estos instrumentos es implementada a través del uso de controles que permiten escoger la función de medida (parámetro) deseada, la resolución

del instrumento, el rango de medida, el tiempo de integración del convertidor A/D, la utilización de filtros, los límites de funcionamiento, etc.

- Se realizó un estudio de las curvas de calentamiento del horno y su relación con los parámetros (PID) de control del horno para la programación de tres rampas de temperatura en el rango de 23°C a 665°C.

- Entre las ventajas y características funcionales de los programas modulares desarrollados en este proyecto destacan:

- En todos los programas, los datos obtenidos en las mediciones siempre pueden ser almacenados en un archivo .txt o en un proyecto de Origin de forma automática, lo que facilita el posterior estudio de las medidas. El usuario determina el nombre del archivo a salvar.

- Además de la variable tiempo, común a todas las medidas, se incorpora la variable temperatura a nuestro sistema. De este modo, cualquier medida realizada puede quedar asociada a la temperatura en que se realizó.

- Se tomó la decisión de realizar todas las aplicaciones en programación en bajo nivel y con subVIs puesto que es la manera más básica y rápida de mandar los comandos concretos de instrucciones al instrumento de medida.

- Se utilizó una estructura común de programación en todas las aplicaciones basada en cuatro estados: ini, setup, start y exit.

- Se pueden ejecutar varios programas modulares a la vez, puesto que son aplicaciones específicas de cada instrumento de medida. Así, un usuario puede utilizar más de un instrumento de medida de forma simultánea.

- Todas las aplicaciones cuentan con un control denominado display que permite implementar la función disponible en los instrumentos de apagar su pantalla (multímetro y picoamperímetro) o deshabilitarla (electrómetro o SourceMeter). Cuando un instrumento presenta su pantalla deshabilitada este interacciona a mayor velocidad. Los instrumentos que permiten apagar su pantalla completamente son muy útiles en medidas sobre DUT que se vean afectadas por la presencia de fuentes de luz.

- Los paneles frontales de los programas se diseñaron de forma que fuesen claros e intuitivos, de modo que la colocación de los controles e indicadores está orientada al mismo patrón y los nombres de las variables son similares para todos los instrumentos.

- En los programas que presentan programación de rampa de fuente para el instrumento Keithley 2410 no sólo se implementó con el módulo presente en el instrumento, sino que se realizó una rampa programable por software.

- La aplicación específica *Temp discrim* del instrumento Keithley 2410 permite realizar medidas automáticamente, interaccionando en tiempo real, cuando se alcanzan las condiciones de estabilidad térmica del DUT impuestas por el usuario. Por tanto, se

puede caracterizar eléctricamente el DUT con la característica I-V a distintas temperaturas, así como caracterizar la resistencia del DUT en función de la temperatura, de manera autónoma.

- El programa específico “*Keithley 2410-6517A-6487*” gestiona tres instrumentos (picoamperímetro Keithley 6487, electrómetro Keithley 6517A y SourceMeter Keithley 2410) con el objetivo de aumentar las prestaciones en la función de medida de corriente y voltaje del instrumento Keithley 2410. Este programa permite:

- Una configuración flexible, que posibilita el uso independiente o combinado de estos tres instrumentos.
- Realizar las medidas de forma síncrona o asíncrona, utilizando la función de disparo de dichos instrumentos.

- Todos los programas desarrollados se presentan en dos fases finales. En una primera fase, los programas están disponibles en código abierto, permitiéndose la modificación y mejora de los mismos. En una segunda fase, los programas se presentan blindados en formato ejecutable (.exe) presentando portabilidad, ya que pueden ser instalados y ejecutados en cualquier ordenador aunque éste no tenga instalada la plataforma de desarrollo.

- Todos los programas fueron utilizados comprobando su correcto funcionamiento. Se realizó la caracterización de una muestra de MgO:Li, obteniéndose valores acordes para la energía de activación del proceso de conducción y las curvas características I-V reportadas en la literatura.

En cuanto a las líneas futuras, cabe destacar:

Integrar el control del horno en la aplicación correspondiente de LabView. Hasta ahora, los parámetros de regulación del horno son establecidos manualmente ajenos a la aplicación de LabView, por lo que, sería una opción recomendable integrarlo en nuestra aplicación. Para ello, sería necesario dotar al regulador de temperatura del horno (Fuji PXR-4) con una salida de comunicación (puerto RS485) dado que esta salida es una opción del microcontrolador PXR-4 y que la unidad presente en nuestro laboratorio no la tenía. Para poder comunicarlo con el PC y por tanto con LabView, es necesario contar con un puerto libre RS232 en el PC y el convertidor RS232-RS485, siendo recomendado el modelo RSFC24 de Fuji Electric.

Por otro lado, se pueden desarrollar módulos de programación de Origin bajo la plataforma LabView que realicen el procesamiento y análisis específico de los datos obtenidos (filtrado, trazado de gráfica, cálculo de la pendiente, ajustes, etc.)

Se podría añadir, en todos los programas, un módulo de programación que permita comprobar el estado de conexión de los instrumentos que van a ser controlados en el programa (chequeo de la dirección del instrumento, estado encendido/apagado, etc.).

Incluir una paleta de aplicaciones específicas realizadas permitiría su utilización posterior en el desarrollo de nuevas aplicaciones.

Se podría desarrollar un programa gestor de instrumentos que nos permita gestionar los instrumentos a utilizar en una medida específica.

Otra posible línea de desarrollo es la del Laboratorio de Medidas Eléctricas accesible desde internet. LabView de National Instruments permite ser accesible desde internet mediante la tecnología Web Server de LabView. Así pues, se desarrollaría una solución que integra los sistemas que permiten que los instrumentos sean controlados de forma remota a través de internet desde una máquina “cliente”. Para ello nuestro PC conectado a través del bus GPIB a los distintos instrumentos debe ser configurado como “servidor”. Como ya se ha comentado, el usuario que dispondrá de control remoto a nuestro sistema a través de internet será configurado como cliente. El cliente se encargaría de enviar la petición al servidor, para establecer comunicación con él. Son necesarios 2 PCs para establecer la comunicación: uno como servidor web y otro como cliente web. El servidor web de LabView establece una pasarela CGI (estándar de tecnología que permite la comunicación entre cliente y servidor) para permitir el acceso al ordenador del laboratorio a través de la red Internet utilizando un navegador en el lado del cliente. Para conseguirlo, se ha de crear en el servidor un archivo html que contenga una referencia al archivo.vi e instalar en el ordenador del cliente un plug-in que National Instruments ofrece en su página web (Ref. [13]). LabView contiene un editor del archivo html donde se puede elegir varias opciones de construcción (opción Web Publishing Tool, en el menú Tools).



7. REFERENCIAS

7. REFERENCIAS.

- [1] José Rafael Lajara Vizcaíno y José Pelegrí Sebastián. “LabVIEW. Entorno Grafico de programación”. Marcombo 2007.
- [2] Lázaro, A.M., “LabVIEW. Programación gráfica para el Control de Instrumentación”, Paraninfo 2005.
- [3] Bishop, R. H., “Learning with LabVIEW 7 Express”, National Instruments 2004.
- [4] “Low Level Measurements Handbook”, Keithley 2006.
- [5] “Model 182. Sensitive Digital Voltmeter. Instruction Manual”, Keithley 1990.
- [6] “Model 2400 Series. Source Meter. User’s Manual”. Keithley 2002.
- [7] “Model 6487 Picoammeter/Voltage Source. Reference Manual”, Keithley 2002.
- [8] “Model 6517A. Electrometer. User’s Manual”, Keithley 2003.
- [9] “Agilent 34401A. Multimeter. User’s Guide”, Agilent Technologies 2003.
- [10] Robert L. Powell, William J. Hall, Clyde H. Hyink, Jr. y Larry L. Sparks. “Termocouple Reference Tables Based on the IPTS-68”. Omega Press 1975.
- [11] <http://www.keithley.com>
- [12] <http://www.agilent.com>
- [13] <http://www.ni.com>
- [14] <http://forums.ni.com/>



8. ANEXO

8.1. Simulación de costes.

En este apartado se estimará el coste económico total del proyecto. Se presenta un desglose presupuestario de los costes directos, clasificados en:

- Costes de personal.
- Costes de equipos y programas.
- Otros costes directos.

- ***Costes de personal.***

El equipo de trabajo está formado por dos personas: el jefe de proyecto, cuya función es la de supervisión y aprobación, y es realizada por el tutor del proyecto; y el ingeniero técnico, cuyas funciones son la de analista, diseñador y programador, que son desarrolladas por el autor del proyecto. Las funciones del ingeniero técnico se describen a continuación:

- Analista: estudia los requerimientos del cliente, comprobando la viabilidad de los mismos y analizando los problemas planteados.
- Diseñador: busca la mejor solución de diseño a los problemas planteados.
- Programador: Implementa el diseño planteado y realiza pruebas de funcionamiento de las aplicaciones desarrolladas.

Se establece una dedicación de un mes para el jefe de proyecto en base a 25 horas de trabajo semanales. El ingeniero técnico emplea 20 horas semanales durante un período de 6 meses. La tabla 8.1 muestra el coste del personal del equipo de trabajo, en función de su categoría y dedicación.

Personas	Categoría	Dedicación (meses)	Coste hombre/mes	Coste total
1	Jefe de proyecto	1	3.200 €	3.200 €
1	Ingeniero técnico	6	2.100 €	12.600 €
				15.800 €

Tabla 8.1. Coste del personal en base a su categoría y dedicación.

- ***Costes de equipos y programas.***

Los equipos o dispositivos utilizados en este proyecto se enuncian a continuación:

- Un PC completo.
- Seis instrumentos para medidas eléctricas.
- Tarjetas y cables de la interfaz GPIB.
- Un horno de tubo vertical con regulador de temperatura.
- Termopares tipo K.

La tabla 8.2 muestra el coste correspondiente a los equipos utilizados en el proyecto, en función de su descripción y la cantidad disponible.

Cantidad	Descripción	Coste unitario	Coste total
1	PC completo	900 €	900 €
2	Multímetro Agilent 34401A	2.800 €	5.600 €
1	Nanovoltímetro Keithley 182	4.200 €	4.200 €
1	Picoamperímetro Keithley 6487	7.100 €	7.100 €
1	Electrómetro Keithley 6517A	7.500 €	7.500 €
1	SourceMeter Keithley 2410	8.200 €	8.200 €
1	Tarjeta NI PCI-GPIB 1093	380 €	380 €
1	Tarjeta NI GPIB-USB-HS	450 €	450 €
6	Cable GPIB Blindado	75 €	450 €
1	Horno Hobersal ST-115020-HV	4.400 €	4.400 €
2	Termopares tipo K	25 €	50 €
			39.230 €

Tabla 8.2. Coste de los equipos utilizados.

En cuanto a los programas empleados, fue necesaria la adquisición de las licencias de desarrollo de la plataforma de programación *LabView* y de la aplicación *LabView Application Builder*. La tabla 8.3 muestra el coste de estas licencias.

Descripción	Coste total
Licencias de LabView y de LabView Application Builder	8.600 €
	8.600 €

Tabla 8.3. Coste de las licencias de LabView y LabView Application Builder.

- **Otros costes directos.**

En el caso del material fungible se estima que se generó un coste de 18€ en material de oficina.

En cuanto al transporte al lugar de desarrollo del proyecto, se acordó una dieta de desplazamiento para el ingeniero técnico de 115€/mes durante los 6 meses de dedicación al proyecto, incluyéndose en ésta otros desplazamientos complementarios. La dieta de desplazamiento para el jefe de proyecto es de 210€ por el mes empleado.

La tabla 8.4 muestra estos costes directos del proyecto que no habían sido descritos en los apartados anteriores.

Descripción	Coste total
<i>Material oficina</i>	18 €
<i>Dietas desplazamiento</i>	900 €
	918 €

Tabla 8.4. Otros costes directos del proyecto.

- ***Presupuesto total***

El *presupuesto total* estimado del proyecto asciende a la cantidad de 64.548€. Esta cifra se obtiene de sumar los costes totales: del personal, de los equipos y programas y de otros costes directos; como se muestra en la figura 8.5.

Desglose	Costes totales
<i>Personal</i>	15.800 €
<i>Equipos</i>	39.230 €
<i>Programas</i>	8.600 €
<i>Otros costes directos</i>	918 €
	64.548 €

Tabla 8.5. Coste total del proyecto.